

MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITÉ DE BLIDA

INSTITUT DE CHIMIE INDUSTRIELLE

Mémoire de Magistère

Spécialité : Chimie Industrielle

Option : Génie des procédés

MODELISATION ET SIMULATION

D'ATELIER DE PRODUCTION CHIMIQUE EN MODE BATCH

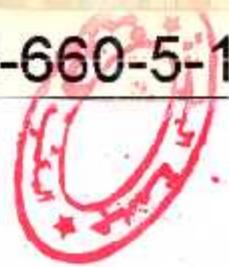
Par

Nadjib HOUARI

Présenté devant le jury constitué de MM :

MOULAI MOSTEFA.N, maître de conférences,
HANANE. F, maître de conférences,
MOKHBAT.E. H, chargé de recherche,
SAHNOUNE.A, chargé de recherche,
BEZZINA, Maître de conférences,

président
examinateur
examinateur
examinateur
rapporteur



MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE DE BLIDA

INSTITUT DE CHIMIE INDUSTRIELLE

Mémoire de Magistère

MODELISATION ET SIMULATION

D ' ATELIER DE PRODUCTION CHIMIQUE EN MODE BATCH

Par

Nadjib HOUARI

RESUME

Ce travail vise à montrer le rôle que peut avoir la simulation discrète événementielle dans l'évaluation et l'analyse d'un atelier batch.

L'hypothèse consiste à considérer que l'atelier est équivalent à un système de production discret avec des temps opératoires estimés sur l'historique de l'atelier.

L'étude consiste à modéliser et à simuler un atelier de production de monomères batch et d'évaluer les gains de productivité que l'on peut attendre de la maîtrise du séquençement de ces opérations.

Le modèle est basé sur le concept de file d'attente où les ressources physiques représentent les guichets et le produit fabriqué le client. La logique de changement d'état du produit se traduit par les durées de transition affectées à chacune des activités ainsi que les ressources. L'emploi de contraintes de précédence définit la trajectoire ou la suite d'activités qui forment la recette de fabrication d'un produit donné.

Cette vision discrète de l'atelier occulte complètement la composante continue du système en faveur d'une modélisation stochastique des durées de chacune des activités composant le processus de production.

L'approche s'est avérée correcte puisque le modèle construit sur la base de ces considérations a fourni des résultats très encourageants et des réponses aux interrogations aussi diverse et variées, allant du dimensionnement d'équipements à l'ordonnancement des ordres de fabrication, en passant par le problème de recherche de goulots d'étranglement ou l'impact des extensions futures envisagées.

Enfin, on peut envisager raisonnablement l'application de cette technique à l'ensemble des ateliers batch à condition de pouvoir estimer à priori, comme nous l'avons fait, les durées opératoires.

ملخص

إن الهدف من هذا العمل هو تبيان الدور الذي قد تقوم به المحاكاة المنفصلة في تقييم وتحليل ورشة منفصلة.

تقوم الفرضية على فكرة اعتبار أن الورشة مساوية لنظام إنتاج منفصل مع إعطاء أزمدة عملية مقدرة من العرض الزمني للورشة.

تتضمن الدراسة على إعطاء نموذج وتمثيل ورشة إنتاج منفصل إلى جانب عملية تقييم الفوائد الانتاجية التي قد تنتظرها من عملية التحكم في ترتيب وتسلسل العمليات.

يرتكز النموذج على فكرة طيور الانتظار أين تمثل الموارد الفيزيائية الشبائيك والمادة المنتجة الزبون ويتجلى منطلق تبدل حالة المادة في مدة الانتقال الخاصة بكل نشاط على حدى وفي الموارد أيضا. ويقوم استعمال مبدئ الأفضلية في إيضاح المسار أو تسلسل الأنشطة التي تشكل طريقة صنع مادة معينة.

لقد تأكد بأن هذا التصور مصيبا بمان النموذج المبني على أساس هذه الاعتبارات قد زودنا بنتائج مشجعة إلى جانب إجابته على أسئلة مختلفة ومتنوعة بدأ بتحديد حجم الأجهزة مرورا بمشكل ترتيب العمليات أو تأثير التوسعات المستقبلية المتوقعة.

أخيرا، أصبح بمقدورنا التفكير بشكل صحيح في تطبيق هذه التقنية في مجمل الورشات المنفصلة شريطة أن تقوم بتقدير مسبق للفترات الزمنية لكل عملية.

ABSTRACT

This work should enable the reader to understand the usefulness of a discrete time simulation in the evaluation and analysis of a batch processing plant.

The hypothesis used in this work is based on the consideration that the plant is equivalent to a discrete processing plant with time parameters estimated over the past performance of the plant.

This work is devoted to the modeling and simulation of a processing plant specializing in the production of monomers. We also consider the productivity gain that is expected from such a modeling.

The model is based on the queuing theory concept where physical resource and the product are represented as desks and clients, respectively. The state transition is translated as the transition time of each activity as well as resource.

The use of constraints defines the trajectory or the events defining the complete process.

The approach developed in this work was found to correct since the model based on these constraints provided nice results and answers to questions ranging from equipment selection and sizing, work scheduling, bottleneck avoidance and future extensions to the system.

Finally, we can reasonably expect the use of this technique to batch processing based plant on the condition that an a priori estimate of the processing duration is available.

REMERCIEMENTS

Je tiens en premier lieu à exprimer mes vifs remerciements et toute ma gratitude à M. Mohamed BEZZINA qui a bien voulu m'encadrer et me diriger tout au long de ce travail.

Je remercie chaleureusement mon ami M. Lyes HAMAIDI qui a co-dirigé ce travail pour l'assistance et l'aide qu'il n'a cessé de me prodiguer.

Que M. MOULAI MOSTEFA Nadji trouve ici l'expression de ma reconnaissance pour l'honneur qu'il m'accorde en présidant le jury de soutenance.

Je voudrais remercier Messieurs HANANE, MOKHBAT, OUZZANE et SAHNOUNE pour avoir bien voulu juger ce travail et composer le jury .

Je suis particulièrement reconnaissant à mes amis Salim BOUZOUIDJA et Amine CHACHOUA pour m'avoir hébergé durant mes deux séjours en France.

Des remerciements chaleureux à l'ami Djillali NAHAL pour son aide précieuse.

Enfin, que tous ceux qui ont contribué à l'élaboration et la réalisation de ce travail et que je n'ai pu citer, trouvent ici la preuve de ma sincère reconnaissance.

TABLE DES MATIERES

RESUME.....	i
REMERCIEMENTS.....	ii
TABLE DES MATIERES.....	iii
LISTE DES FIGURES ET TABLEAUX.....	iv
INTRODUCTION.....	1
I ANALYSE DES SYSTEMES DE PRODUCTION CHIMIQUE.....	4
I.1 Aperçu général.....	4
I.2 Présentation générale d'une unité de production.....	6
I.3 Classification des unités.....	14
I.4 Le procédé hybride.....	16
II ANALYSE DE L'INGENIERIE DES PROCEDES DISCONTINUS.....	17
II.1 Description des problèmes de conception et de conduite.....	17
II.2 La conduite optimale des procédés.....	19
II.3 Définition thématique.....	20
III APPROCHE GLOBALE POUR LA MODELISATION ET LA SIMULATION D'UN ATELIER DE PRODUCTION.....	22
III.1 Introduction.....	22
III.2 Analyse du problème et recueil des données.....	24
III.3 Le processus de modélisation.....	28
III.4 Exploitation d'une simulation.....	30
IV MODELISATION DE L'ATELIER.....	33
IV.1 Modèle du flux de produit.....	35
IV.2 Le modèle du flux de matière et flux d'information.....	42
IV.3 Le modèle des ressources.....	43
IV.4 Estimation des paramètres.....	49
V ETUDE COMPARATIVE DES PRODUITS COMMERCIAUX DE SIMULATION.....	61
V.1 Introduction.....	61
V.2 Remarques générales concernant l'étude comparative.....	64
V.3 Les critères d'évaluation.....	65
V.4 Résultats de l'étude.....	71
V.5 Choix et stratégie.....	71
VI DESCRIPTION DE L'ATELIER.....	77
VI.1 Introduction.....	77

VI.2 Etapes du procédé.....	77
VIII LE MODELE LOGIQUE DE L'ATELIER.....	81
A- Modèle du flux de produit.....	81
B- Modèle des ressources.....	95
IX SIMULATION DE L'ATELIER SOUS ARENA.....	103
IX.1 Implémentation.....	103
IX.2 Validation/Vérification du modèle.....	106
IX.3 Amélioration.....	111
IX.4 Exploitation du modèle.....	112
CONCLUSION.....	117
REFERENCES	
ANNEXE 1	
ANNEXE 2	
ANNEXE3	
ANNEXE 4	
LISTE DES SYMBOLES	

LISTE DES FIGURES ET TABLEAUX

Figure 1.1 :	Exemple d'un flowsheet.....	7
Figure 1.2 :	Diagramme de Gantt : première politique.....	11
Figure 1.3 :	Diagramme de Gantt : deuxième politique.....	11
Figure 1.4 :	Diagramme de Gantt : troisième politique.....	12
Figure 3.1 :	Etapes d'une modélisation/simulation.....	25
Figure 4.1 :	Les composantes d'un actigramme.....	35
Figure 4.2 :	Les différentes jonctions.....	40
Figure 4.3 :	Exemple de réduction d'un échantillon aux périodes stables..	51
Figure 4.4 :	Exemple d'un box-plot.....	52
Figure 4.5 :	Exemple d'échantillon réel et d'échantillon simulé.....	55
Figure 6.1 :	Schéma de l'atelier.....	77
Figure 6.2 :	Etapes de fabrication dans l'atelier.....	77
Figure 8.1 :	Evolution de la production sans la contrainte du week end..	113
Figure 8.2 :	Effet sur la production d'un réacteur supplémentaire.....	115
Tableau 5.1 :	Résultats de l'étude comparative.....	73
Tableau 8.1 :	Résultats de la simulation du modèle initial.....	109
Tableau 8.2 :	Résultats de la simulation du modèle amélioré.....	112

INTRODUCTION GENERALE

La conduite des ateliers de fabrication continue constitue un problème aujourd'hui relativement bien maîtrisé. Ces ateliers sont en général fortement automatisés et l'optimisation de leur conduite peut largement bénéficier de la théorie de la commande continue développée par l'automatique. Cette conduite relève en grande partie de la gestion d'alarmes et du réglage des consignes de boucles de régulation, tâches qui s'intègrent naturellement dans les systèmes de supervision existants.

L'optimisation de la gestion d'ateliers de fabrication discontinue constitue en revanche un problème qui reste ouvert. Dans ces ateliers, la matière est traitée sous forme de lots bien identifiés qui subissent une succession d'opérations décrites sous forme de recettes de transformations physico-chimiques, mais également des transferts de fluides entre les équipements et de nettoyage de ces derniers. La gestion optimale de ces ateliers requiert un contrôle strict des transformations mais également la maîtrise du séquençement dans le temps de l'ensemble des opérations. Elle relève donc à la fois de la commande continue et de la commande logique (discrète) et il n'existe pas à l'heure actuelle une méthode mathématique universelle pour l'optimiser. Une difficulté majeure réside dans la variété des contraintes de fonctionnement de ces ateliers.

Il existe déjà une connaissance approfondie des transformations physico-chimiques et de leur contrôle. L'étude a pour objectif principal d'évaluer les gains de productivité qu'on peut attendre de la maîtrise du séquençement de ces opérations. Cette étude sera réalisée en analysant de façon détaillée le fonctionnement d'un atelier de fabrication d'un monomère. Cet atelier, qui présente l'avantage d'être neuf et multi-produits, peut donc constituer un cas d'étude représentatif.

Outre l'analyse bibliographique et la partie théorique, l'étude comportera deux étapes :

Une première étape de modélisation qui permettra d'établir le schéma des flux de l'atelier et de dresser l'inventaire des principaux outils disponible sur le marché.

Une seconde étape de développement sera consacrée à l'implémentation et à l'exploitation du modèle au travers de sa simulation. Le déroulement détaillé de l'étude sera donc le suivant :

Inventaire des flux et des méthodes

- Etablissement du schéma de flux de l'atelier

Celui ci recouvre :

Le séquençage des différentes opérations qui consiste à énumérer de façon exhaustive les étapes de la fabrication et les tâches liées à la conduite de l'atelier (analyse), à estimer au mieux leurs durées statistiques et à identifier leurs conditions de déclenchement ou de blocage (épuisement ou saturation de stockage, disponibilité du personnel par exemple...).

Un sous-ensemble représentatif des différents produits fabriqués sur l'atelier sera traité de manière à prendre en compte les contraintes de flexibilité liées à l'enchaînement de recettes différentes.

Les informations collectées seront formalisées dans un modèle permettant de simuler l'évolution d'un produit à travers l'atelier.

- Inventaire des principaux outils disponibles sur le marché :

Ceux ci doivent permettre de modéliser et de simuler des flux de produits dans un atelier chimique discontinu multi-produits. Cette étude comparative sera réalisée sur les différents logiciels disponibles sur le marché et en se basant sur les travaux théoriques publiés dans les revues spécialisées.

Développement du modèle :

Il consistera en :

- Une implémentation : La mise en forme sera effectuée de façon générique à l'aide du logiciel ARENA dont les fonctionnalités sont susceptibles de mettre rapidement en évidence les performances du modèle.
- Une exploitation : Il s'agit d'évaluer la pertinence du modèle pour optimiser la gestion de l'atelier, à savoir :
 - 1- Détecter les étapes limitantes (goulots d'étranglement) pour une recette donnée et pour un ensemble de recettes, ceci pour un équipement et un personnel donné.
 - 2- Proposer des améliorations pour supprimer ces goulots.
 - 3- Evaluer l'intérêt des améliorations envisagées.
 - 4- Estimer l'impact des extensions futures prévues dans l'atelier.

I. ANALYSE DES SYSTEMES DE PRODUCTION CHIMIQUE

I.1 APERCU GENERAL

Le génie chimique a acquis ses lettres de noblesse dans les domaines de la conception et de l'exploitation des procédés à grande capacité de production, devenu synonyme de procédés continus produisant en régime permanent.

Les complexes pétrochimiques constituent une illustration typique de cette catégorie de système de production. Des réseaux locaux d'unités de production fabriquent une multitude de composés organiques à partir d'une matière première principale : le pétrole. Des critères de rentabilité et les contraintes de productivité ont conduit les concepteurs de procédés vers une intégration d'un patchwork d'unités travaillant majoritairement en régime permanent, et en synchronisation continue pour minimiser les stockages de matières dangereuses.

Mais la mutation du génie chimique au génie des procédés a ouvert de nouvelles perspectives et de nouveaux champs d'action voir une nouvelle approche.

Ainsi, les systèmes de production des industries agro-alimentaires, biotechnologiques, électroniques ou pharmaceutiques peuvent être décrits et analysés en termes d'opérations unitaires, de bilans de conditions opératoires.

Le procédé est rarement de nature exclusivement continue, le mode de production discontinue y est quasiment une règle d'où l'intérêt suscité car l'ouverture vers ces nouveaux secteurs d'application génère une catégorie de problèmes originaux et entre autres, les simulateurs dynamiques doivent sur le plan technique s'adapter à des stratégies de production autres que la production continue.

Les programmes généraux de simulation des procédés chimiques calculent les bilans de matières et d'énergie des procédés continus en régime permanent. Ils sont généralement utilisés :

- En conception , pour valider des choix au niveau du flowsheet du procédé grâce à une analyse quantitative des performances ou pour confirmer des choix technologiques .
- Sur installation en fonctionnement , ils permettent d'établir un diagnostic de l'état du procédé et de rechercher des conditions de réglage optimales .

La recherche de conditions de fonctionnement stables ainsi que le contrôle du régime permanent s'appuient sur la connaissance de la dynamique de l'unité. La simulation dynamique permet de déterminer les réponses du procédé continu en boucle ouverte suite à des perturbations programmées, réponses qu'il est difficile de quantifier par des expériences sur site pour des raisons de coût et de faisabilité. Cette information servira de données aux méthodes de conception du système de contrôle / commande.

La majorité des applications de la simulation dynamique est relative à des opérations unitaires isolés ou à des procédés continus en régime transitoire

La dichotomie qui existe entre les relations physiques formant les équations d'une part et les relations logiques décrivant les enchaînements entre les opérations de transformations est à la base de la séparation du modèle mathématique en deux parties : le modèle continu et le modèle discret. Le modèle discret est utilisé pour décrire les trajectoires de la matière en cours de transformations au cours et en fonction du temps. Le résultat fourni par la résolution de ce modèle est une suite de changements d'états exprimés en terme d'activités et d'événements .

Tout procédé peut être décomposé en sous ensemble de production ou chaque sous ensemble appartient à l'une des deux classes fondamentales procédé continu ou procédé discontinu.

1.2. PRESENTATION GENERALE D'UNE UNITE DE PRODUCTION

1.2.1. Le procédé continu

L'expression « production continue » a une connotation mathématique par rapport au temps .

Par production continue, on sous entend que le produit est fabriqué et disponible en bout de chaîne à tout instant .La perception de l'expression par un ingénieur de génie chimique sera plutôt une continuité dans l'espace . Ceci du fait que la majorité des produits traités sont à l'état de fluide. Le transport des produits se fait aisément et sans rupture par des organes de mise en mouvement fonctionnant régulièrement (pompes, compresseurs).

Sur ce point particulier, les procédés chimiques ont un haut niveau d'automatisation si on les compare à certaines industries de manufacture où le problème réside dans la gestion des robots réalisant le transport des pièces .

En procédé continu, la matière est continuellement en cours de traitement dans une série d'appareils connectés (train d'appareils) ou la fonction de chaque appareil est unique et l'ensemble de l'unité est consacré à une seule est même production pendant son fonctionnement.

Sa structure est schématisée par un graphe appelé flowsheet (fig I.1) ; où les noeuds sont les appareils (O.U), les jonctions linéaires caractérisant les liaisons physiques ou courants entre les appareils .

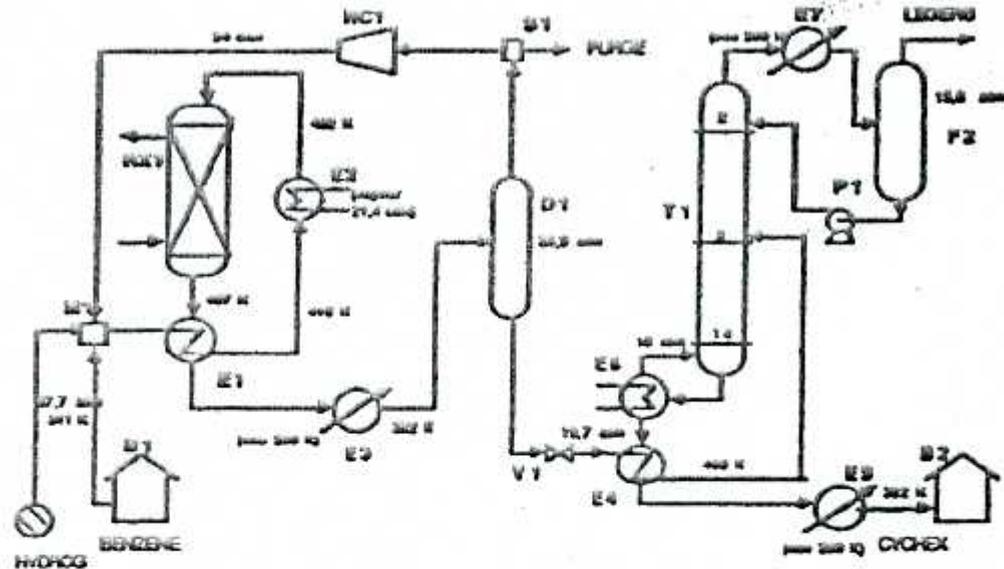


Fig I.1 exemple d'un flowsheet

Les variables d'état sont les débits et les compositions chimiques dans les différentes phases constituant le courant de matière ainsi que la température et la pression. On décrit habituellement le procédé en fournissant la valeur du vecteur d'état pour les courants d'entrée et de sortie des appareils .

En régime permanent, les variables d'état sont indépendants du temps , les systèmes de régulation sont implantés pour maintenir l'ensemble du procédé dans un état permanent dit point nominal de fonctionnement .Les valeurs constantes des variables d'état contrôlées alimentent la consigne des régulateurs, et la commande a pour objectif d'incuber les effets de perturbation sur le système.

Les régimes transitoires correspondent à des variations des variables d'état dans le temps causées par des perturbations telles que les manoeuvres sur les consignes des régulateurs, l'arrêt de l'installation ou le changements d'un point nominal de fonctionnement.

1.2.2. Le procédé discontinu :

La production discontinue est employée pour des fabrications de petits tonnages pour lesquelles une mise en œuvre en continu demanderait des volumes trop petits, pour des opérations de fabrications délicate impliquant soit un savoir faire dont l'équivalence en continu n'est pas simple à imaginer soit des opérations périodiques de nettoyage des appareils ou des contraintes liées à la sécurité ou la protection de l'environnement.

Elle est calquée sur le principe du traitement par lot (batch). Le lot est une quantité finie de matière qui va subir une série de transformation pendant son passage dans l'unité, chaque appareil traite un lot pendant l'intervalle de temps nécessaire pour mener à bien l'ensemble des fonctions qui lui sont assignées. Le lot est ensuite transféré à l'appareil en aval.

Le temps est une variable de première importance lorsqu'on décrit le fonctionnement d'une unité discontinue. Lors de la traversée de l'unité, la trajectoire d'un lot est caractérisée par sa position dans l'espace (l'appareil qui le contient et le degré de transformation atteint) et le temps. C'est la date d'achèvement de la fabrication du lot qui intervient dans le calcul de la productivité, rapport de la quantité de produit réalisé au temps requis pour la produire.

Le génie chimique traditionnel s'est beaucoup consacré au dimensionnement des installations batchs en considérant chaque appareil ponctuellement pour une production donnée.

Un appareil est conçu hors de son environnement industriel et les contraintes sur la durée opératoire sont très rarement formulées à ce niveau du développement. On s'attache généralement à calculer les dimensions et toutes les caractéristiques géométriques d'un appareil et à déterminer des réglages sur les conditions opératoires qui permettront de réaliser une qualité fixée à

priori la durée opératoire est un résultat du calcul. L'utilisation maximale du matériel sur une installation est un critère de performance important, lorsque par exemple le coût des appareils est élevé .

1.2.3. Unité monoproduit :

Les matières premières sont toujours les mêmes et les opérations de transformations sont mises en œuvre dans des conditions identiques à chaque fabrication. Une seule production mobilise l'unité pendant son temps de service.

Le temps d'occupation d'un appareil est systématiquement composé de trois phases :

- Le remplissage de l'appareil.
- L'accomplissement de la transformation physico-chimique .
- La vidange de l'appareil et un nettoyage optionnel.

En dehors de ces trois activités , l'appareil est en attente de mobilisation . Ces trois phases ne sont pas obligatoirement séquentielles et indépendantes . Le remplissage de l'appareil peut se poursuivre pendant que la transformation a débuté , c'est le cas d'un réacteur à alimentation répartie (fed-batch) .

De même, une activité de vidange partielle est également envisageable au cours de la deuxième phase.

Les phases initiales et finales de transport de la matière ne sont pas toujours productives.

Leurs réalisation peut se chiffrer par une perte de temps qu'il faut compenser par une surcapacité, si on se fixe la productivité comme objectif.

La fabrication d'un produit est constituée d'une suite d'étapes qui nécessite de disposer de matières premières, d'appareils, d'unités énergétiques, de main d'œuvre, d'instruments de mesure, de régulateurs...

La définition exacte d'une étape ou tâche est difficile, il s'agit d'une activité élémentaire dans la série des traitements physiques appliqués au lot.

Les tâches peuvent être regroupées en opération. Une opération est un sous-ensemble de tâches d'une fabrication qui sont réalisées dans un même appareil.

La suite des tâches ordonnées dans le temps qui décrit la méthode de fabrication du produit est désignée comme la recette de fabrication de produit. On distingue l'appareil d'une part, de la fonction réalisée dans un appareil d'autre part parce- qu'un appareil peut être utilisé par plusieurs opérations d'une même recette et les fonctions multiples pour une opération donnée.

La dynamique de chaque opération de l'unité batch est dictée par :

- La durée de chaque opération.
- La fréquence de lancement de lots.
- Le nombre d'appareils disponibles pour chaque opération et leur taille.

Soit, l'exemple d'un produit fabriqué par une recette de trois opérations

OP	Durée	Hors phases de transport
1	1,5	Les phases de transport sont de 0,5 ut
2	7	
3	2,5	

L'activité du procédé est représentée par un diagramme de Gantt[1] fig 1.2.

1^{er} cas : 3 appareils : chaque appareil est affecté à une seule opération. Le lancement d'un lot est effectué dès que le lot en cours a quitté l'unité.

$T_{cl} = T_{séjours} = 13 \text{ Ut}$ (fig I 2)

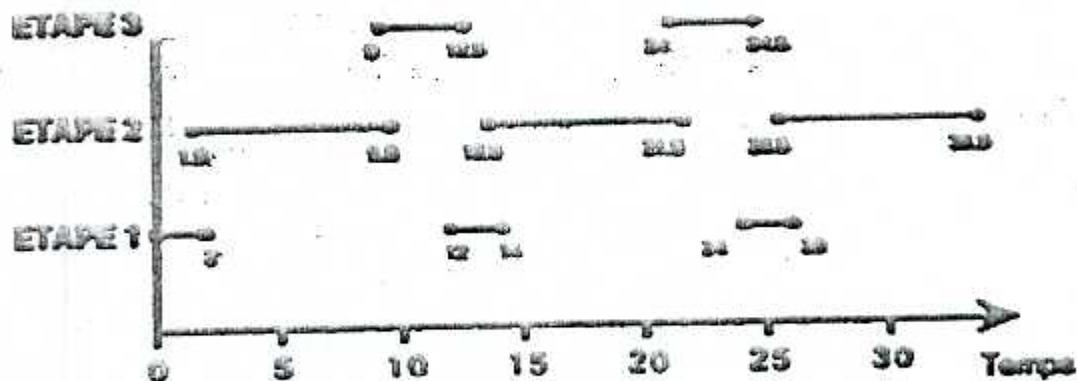


Fig I.2 Diagramme de Gantt[1].

Des zones blanches sont présentés sur chaque lignes, les appareils ne sont pas utilisés au maximum des possibilités.

Sur le diagramme de la figure I.3 est reporté une politique où le deuxième appareil est continuellement actif. La durée T_{cl} est égale à la durée opératoire totale du 2ème appareil (8 U t); T_s reste le même.

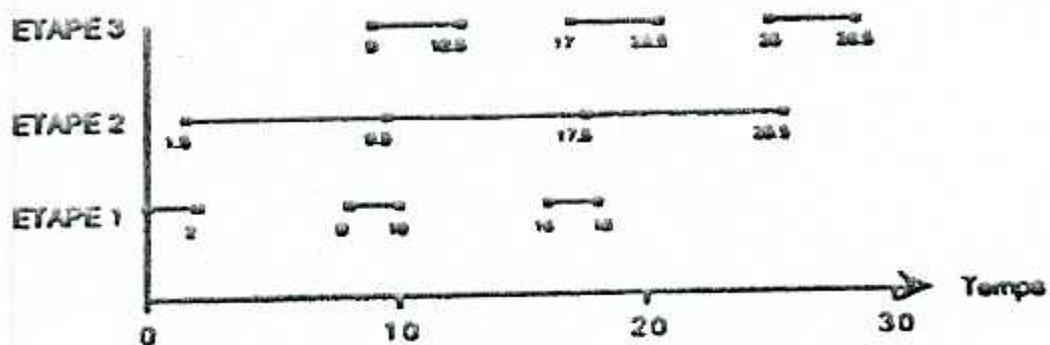
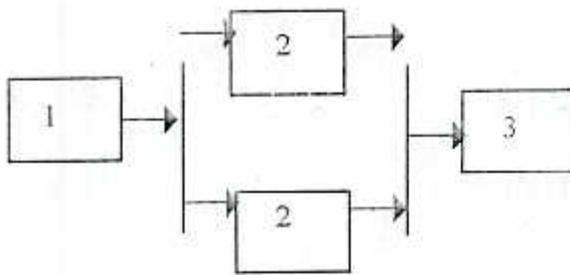


Fig I.3 Diagramme de Gantt [1]

Augmenter la productivité suppose que l'on brise le goulot d'étranglement qu'est cette deuxième opération en multipliant le nombre d'appareil pour cette deuxième opération.



La figure 1.4 montre que les deux appareils de la deuxième opération sont utilisés continuellement en déphasage pour ne pas générer d'attente vis à vis des opérations amont et aval, Tci a été divisé par deux par rapport à la politique précédente et par quatre par rapport à la politique initiale.

Le fonctionnement en déphasage permet d'augmenter la fréquence de traitement du lot sur la ligne de production par contre un fonctionnement simultané permet d'augmenter le volume des lots.

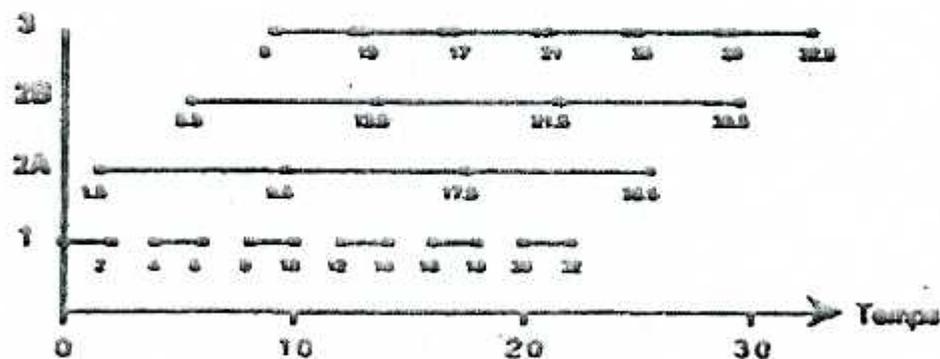


Fig 1.4 Diagramme de Gantt

1.2.4. Les unités complexes .

La flexibilité de l'outil de production est un concept moderne qui cherche à imposer des méthodes, aussi bien au niveau du design qu'au niveau de la gestion d'une installation et de sa conduite, permettant de manière optimale par

rapport à la demande de marché. Une des facettes du concept de flexibilité est l'utilisation d'un procédé pour fabriquer plusieurs produits différents en utilisant les mêmes ressources. C'est sur la politique de la gestion de production qu'il faut jouer pour flexibiliser le système.

1.2.5. Les ressources:

Les ressources sont constituées par le potentiel technique et humain disponible sur l'unité, les appareils et la main d'œuvre.

On peut distinguer les ressources consommables dont le potentiel s'épuise à chaque utilisation (énergie, matière première), des ressources renouvelables qui sont libérés avec le même potentiel après chaque fin d'opération (appareil, main d'œuvre).

La disponibilité d'une ressource est une contrainte importante lorsque la ressource est partagé entre les activités. Si un conflit d'utilisation d'une ressource partagée se produit, il en découle des situations d'attente et des déclenchements d'opération sont différés.

1.2.6. Notion de produit intermédiaire :

Les unités complexes sont conçues pour bon nombre d'industries où les produits sont composés d'une même base, mais se distinguent finalement par une caractéristique singulière ; les fabrications de peinture sont un exemple où l'étape de coloration forme la touche finale. La notion de produit intermédiaire est fondamentale dans ce contexte, lorsque plusieurs produits finaux sont élaborés à partir d'une base commune, la description des politiques de production est facilitée par la définition d'une recette indépendante pour chaque intermédiaire. La notion de recette n'est donc pas systématiquement associé à la fabrication des produits finis. Une fabrication peut être décrite en plusieurs recettes faisant apparaître des composés intermédiaires.

I.3.CLASSIFICATION DES UNITES

La littérature spécialisée en génie des procédés répertorie 3 politiques classiques de gestion de l'unité de production (aspect agencement et dynamique) .

I.3.1 Unité multiproduit :

Dans une unité multi-produit, chaque produit est fabriqué selon une seule et même recette.

Les débuts de campagne de fabrication se succèdent dans le temps sans se chevaucher . L'unité est configurée avec un seul agencement d'appareils, le réglage des conditions opératoires peut être différent d'une recette à l'autre.

Le changement de production s'accompagne parfois d'un délai de remise en état de l'unité. Les délais ne sont pas forcément les mêmes selon les couples des produits et l'ordre chronologique de lancement de campagne de production.

Une installation formée de plusieurs lignes de fabrication multi-produits parallèles, non nécessairement liées à la même recette est nommée multi-unité

I.3.2 Unité multi-objectif :

Lorsque les recettes des produits sont différentes et que l'unité est employée pour plusieurs campagnes de production simultanées avec partage du matériel on parle d'unité multi-objectif.

Cette classification est utile pour pouvoir aborder les problèmes d'ordonnancement et permet de distinguer des problèmes où le poids des contraintes sur l'utilisation des ressources partagée est radicalement différent .

1.3.3 Conception des unités complexes :

Dans la phase de conception d'une unité complexe , le calcul des dimensions des appareils est compliqué lorsque ce dernier est utilisé pour plusieurs produits. Le dimensionnement doit être réalisé par rapport au produit qui impose les contraintes les plus sévères dit produit clé .

1.3.4 Les politiques de stockage :

Les activités de transport rentrent en compte dans le calcul de la productivité de façon générale. Le maillon de la chaîne de fabrication formé par les deux appareils connectés pendant un transport de la matière peut être analysé comme un processus temporairement continu .

Cette période d'activité continue va ensuite disparaître pour laisser la place à deux appareils indépendants dans leur comportement.

Il y a plusieurs manières d'envisager le cheminement d'un produit entre les appareils.

La possibilité d'accumuler les produits intermédiaires dans un réservoir tampon offre un maximum de souplesse dans la conduite de la production en découplant les phases de vidange et de remplissage de deux opérations de transformations successives.

Ce découplage est d'abord temporel puisque la notion d'activité continue disparaît.

Mais un réservoir tampon permet aussi de modifier le volume du lot entre les opérations en amont et en aval, avec un choix de volume appartenant à une gamme continue.

1.4 LE PROCÉDE HYBRIDE

Un procédé hybride constitué d'au moins deux ateliers connectés ayant des modes de productions différents , continu pour l'un et discontinu pour l'autre .

Tout procédé est supposé décomposable en une série de sous ensembles où chaque élément de la décomposition relève sans equivoque possible d'une classifications de procédé continu ou procédé discontinu.

II ANALYSE DE L'INGENIERIE DES PROCEDES DISCONTINUS

II.1 DESCRIPTION DES PROBLEMES DE CONCEPTION ET DE CONDUITE

Les critères qui prévalent dans la prise de décision chez l'ingénieur sont souvent multiples. Il cherche un juste équilibre entre divers indicateurs et ses actions peuvent chercher plusieurs buts :

- Améliorer une productivité (cycle de production réduit et rendement amélioré)
- Accroître une qualité (meilleure utilisation du Matériel).
- Réduire les coûts (conception optimale et utilisation intelligentes des ressources).
- Améliorer la sécurité : (Gestion automatique)
- Atteindre un haut niveau de flexibilité (changement dans les délais les plus brefs).

II.2. LA CONCEPTION OPTIMALE DES PROCEDES

Le problème préliminaire de conception d'un procédé est formulé dans les termes suivants [1] :

Etant donné :

- 1- Une série de produits, les consignes de production sur un horizon de temps et les prix de vente.
- 2 - Une gamme d'appareils classés par type.
- 3- La recette de fabrication de chaque produit, la nature des opérations, les facteurs de taille et les délais opératoires.

4 - Les règles de transfert.

5 - Le (s) type d'appareil (s) utilisé (s) pour chaque opération.

6- Les ressources complémentaires pour chaque opération.

7- Les durées d'attente lors du changement de fabrications des produits

8- Le coût opératoire pour chaque produit .

9- Un critère de performance impliquant les coûts d'investissements, les coûts opératoires et les revenus de vente .

On devrait déterminer une solution réalisable qui optimise le critère de performance en spécifiant la stratégie de production, en configurant les appareils dans l'unité, en donnant le nombre de réservoir tampon et leurs tailles.

Même avec un calcul simplifié des appareils, la résolution de ce problème est considérée comme difficile à cause de l'aspect combinatoire des solutions possibles. La littérature spécialisée fournit des méthodes pour résoudre un certain nombre de sous problèmes clé : détermination de la recette, choix d'une stratégie de production, calcul de la configuration de l'unité.

Il n'est malheureusement pas possible de considérer ces sous problèmes dans une décomposition hiérarchique du problème préliminaire sans perdre en optimalité dans la solution finale. Les sous problèmes sont en effet dépendants les uns des autres.

II.3. LA CONDUITE OPTIMALE DES PROCÉDES

Le mécanisme de prise de décision qui commande un procédé est présenté hiérarchiquement par rapport au temps.

C'est une échelle de temps très étendue.

La séquence des décisions progresse du plus haut niveau hiérarchique, qui correspond à une validité sur le long terme vers le niveau le plus bas où l'on traite les fonctions de contrôle /commande de la plus petite unité du temps réel par horizon de temps décroissant, les décisions relèvent de la planification, de l'ordonnancement de la coordination et de la commande locale.

- La planification détermine à partir de la demande de marché, les produits fabriqués et la consigne de production allant de la semaine à plusieurs mois. Elle spécifie la date d'entrée et la date de sortie de chaque produit.

- L'ordonnancement détermine le calendrier de fabrication en respectant les contraintes de la planification et en traitant les allocations de ressources et la date de lancement de chaque opération.

- La coordination puis la commande locale contrôlent en temps réel la mise en application des ordres de fabrication du niveau ordonnancement.

La coordination prend en charge la supervision et la surveillance de l'unité. La commande locale est attachée à un appareil et assure la réalisation d'une opération.

L'utilisation des moyens informatiques permet d'instaurer un dialogue efficace entre ces différents niveaux. Par rétropropagation de l'information, chaque niveau peut être consulté et activé pour prendre une décision optimale.

II.4. DEFINITION THEMATIQUE

« La simulation est une reproduction, pas à pas, évènement par évènement de l'évolution du système dans le temps dictée par la logique de changement d'état » [2]. Cette définition est essentiellement axée vers les industries de manufacture. Nous la mettons en parallèle avec celle qui est dédiés aux industries des procédés[1] :

« La simulation représente le fonctionnement d'un procédé défini par ses opérations unitaires, sa structure et ses courants d'alimentation , et la résolution à l'aide d'un ordinateur du système d'équations résultants » .

Cette différence de point de vue se trouve dans la classification générale des outils de simulation. On distingue trois groupes de logiciels selon le type de modèles qu'ils permettent de construire :

- Quand les variables dépendantes sont des facteurs continus de la variable indépendante (qui peut être le temps) , la simulation d'un tel procédé relève de la simulation continue :

l'analogie avec le système réel est réalisée par un modèle mathématique dont les variables d'état sont réelles continues , au sens mathématique du terme

L'objectif est le calcul des débits, composition des phases, températures et pression qui vérifient les équations de bilan de matière et d'énergie.

- Simulation discrète : quand les changements d'état de matière sont discrets, c'est à dire que les valeurs des variables dépendantes changent de façon discrète au cours du temps (elles restent constantes entre 2 évènement). Pour l'homme de productique, le calcul des performances du système est étroitement lié à un problème de transport et de trajectoire de pièces dans l'atelier. La simulation discrète ne cherche pas à définir de manière détaillée le déroulement

d'une opération sur une machine. La notion d'état se restreint aux dates de lancement et d'achèvement de l'opération, à l'identification de l'objet en cours de transformation et de la machine qui le travaille. Il ne s'agit pas de modéliser le perçage d'un trou dans une pièce par exemple mais uniquement de reconnaître les trois états possibles de la pièce au cours du temps : non percée, en perçage, percée. Les variables calculées sont des nombres d'entités traitées au cours du temps et du taux d'utilisations des ressources.

- Simulation combinée : quand certaines variables peuvent être discrètes et d'autres continués ou d'autres continues sur un intervalle seulement.

III APPROCHE GLOBALE POUR LA MODELISATION ET LA SIMULATION D'UN ATELIER DE PRODUCTION [3]

III.1 INTRODUCTION

La résolution d'un problème concernant les systèmes de production discontinus et faisant appel à des techniques de simulation se décompose en un certain nombre d'étapes qu'on rencontre systématiquement dans ce genre d'études.

On peut distinguer trois grandes étapes qui, elles-mêmes, peuvent se décomposer en un certain nombre de phases :

Etape1 : Analyse du problème

Cette étape, qui est parfois négligée, est pourtant sans doute la plus importante. Elle permet de préciser le contexte dans lequel vont être effectuées les étapes suivantes ; réalisée avec sérieux, elle évitera de se lancer inconsidérablement dans n'importe quelle simulation.

Dans cette étape il faut :

- bien identifier le problème qu'on veut résoudre en spécifiant les objectifs qu'on se fixe et le contexte dans lequel on va opérer ;

- effectuer une première modélisation de ce système qui permettra en particulier d'en préciser les frontières et spécifier les données dont on aura besoin ;
- valider cette étape auprès des responsables du site de production.

Etape2 : construction du modèle

Il est important dans cette étape, de construire un modèle et donc un programme très structuré et très modulaire de façon à pouvoir le communiquer et le modifier facilement. On essaiera en particulier de distinguer très clairement le système physique, le système de conduite et le système d'information de façon à rester proche de la réalité. Cette phase de modélisation qui n'est qu'un intermédiaire entre la modélisation systémique et la programmation est quelquefois négligée par les spécialistes mais au détriment de la clarté.

Etape 3 : Exploitation de la simulation

Quand la simulation est validée, elle peut servir de banc d'essai et permettre l'évaluation du comportement dynamique du site modélisé. Son utilisation demande, bien sûr, la définition des entrées et des sorties.

Pour minimiser ou tout ou moins économiser le temps machine et pour faciliter l'exploitation des résultats, il est important de bien définir la campagne d'exploitation, c'est-à-dire de bien sélectionner les essais à effectuer et d'utiliser une mise en forme adéquate des résultats en fonction des objectifs fixés dans l'analyse du problème.

Toutes ces étapes sont résumées sur la figure III.1 et vont être reprises en détail dans les paragraphes qui suivent.

III.2. ANALYSE DU PROBLEME ET RECUEIL DES DONNEES

Il faut noter que pour des études de cas industriels courants, il n'est pas rare que l'étape de collecte et de traitement des données représente 50% voir même 80% du temps total de l'étude de modélisation de l'atelier. La phase de collecte des données mérite ainsi qu'on y consacre le temps nécessaire, car de sa bonne réalisation va dépendre en très grande partie la représentativité des résultats obtenus.

Il est très difficile de définir une liste de données nécessaires et suffisantes à l'établissement et à l'exécution d'un modèle de système de production. Le type et le nombre de données nécessaires dépendent bien évidemment du point de vue de l'analyste. Plus le degré de détail souhaité est important plus le nombre de données à renseigner est grand.

Cependant, certaines données, dont la liste sera dressée ci-après, sont quasiment toujours nécessaires dans la modélisation des ateliers de production. On peut grossièrement classer ces données dans les catégories suivantes :

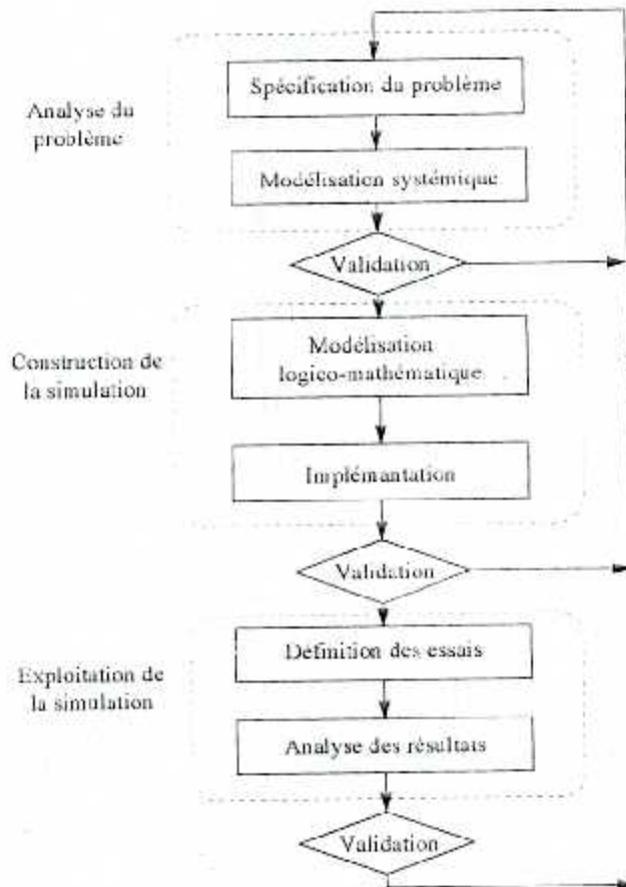


Figure III.1 : Etapes d'une modélisation/simulation

Données sur le batch à fabriquer

Elles concernent surtout la recette de fabrication. C'est la séquence opératoire, c'est-à-dire la succession des opérations de transformation, la liste des ressources sur lesquelles peuvent être effectuées les opérations, les temps opératoires, les temps d'arrêt...

La définition de la séquence opératoire permet de connaître le ou les itinéraires possibles pour un type de produit donné, ainsi que les temps de mobilisation de toutes les ressources nécessaires à l'accomplissement de chacune des opérations.

Données sur les moyens de production

Il s'agit là de déterminer le nombre et le type des appareils utilisés dans l'atelier. La fiabilité et la disposition des moyens de production doivent être détaillées en précisant des distributions des durées de bon fonctionnement et une distribution de la durée des pannes.

La collecte des données de fiabilité et de disponibilité des moyens de fabrication est souvent, sinon toujours, le point délicat d'une étude de simulation.

Données sur les stocks

On précise ici les types et la capacité des stocks. La limitation physique des stockeurs dans un atelier induit, en cas de comportement aléatoire d'un équipement (durée opératoire, panne ...), des arrêts sur la partie située en amont ou en aval. Ces arrêts ont une importance primordiale dans les structures de production.

Certains stocks peuvent présenter des particularités : par exemple comporter plusieurs compartiments dont chacun ne peut recevoir qu'un nombre limité de variantes de produit. Ceci introduit une double contrainte de gestion des stocks en plus de sa limitation physique, un compartiment ne peut recevoir que certains types de produit.

Données sur le personnel

Il faut préciser dans cette section le nombre des opérateurs ainsi que les temps qu'il mettent pour accomplir chacune des opérations.

Le personnel sera considéré, pour la modélisation, comme une ressource nécessaire pour accomplir certaines opérations. Comme pour toute ressource, le nombre de personnes dans chaque atelier est limité.

Règles de conduite (conditions d'exploitation)

Ces données sont assez particulières dans la mesure où ce sont généralement des algorithmes. Ceux-ci sont représentables de deux façons dans la plupart des logiciels usuels de simulation :

- par utilisation de règles 'pré-programmées'
- par programmation directe utilisant le langage de simulation lui-même ou le langage informatique sous-jacent.

Les règles de conduite sont du type suivant :

- règles de lancement des produits à fabriquer : ces règles décrivent le processus de lancement des ordres de fabrication dans l'atelier. Les méthodes de lancement sont nombreuses et variées : à la commande ou en fonction de prévisions, par lots Ces règles entrent dans la domaine classique de la gestion de production.
- règles d'affectation des moyens et ressources aux opérations : ce sont des règles de mobilisation et de libération des ressources par rapport à une séquence opératoire donnée. Ces règles permettent de savoir quelle ressource choisir parmi plusieurs, où restituer une ressource.
- règles de gestion du personnel : de façon analogue aux autres ressources, ces règles sont utilisées pour modéliser : une préférence de compétence, une gestion des conflits en cas d'appel simultanés, etc.

III.3. PROCESSUS DE MODELISATION

La phase de modélisation est certainement la plus délicate et la plus cruciale dans le processus de simulation.

Elle demande, en effet, à la fois une bonne connaissance des outils informatiques de simulation, afin de choisir celui qui est le plus approprié et d'en connaître les principales fonctionnalités, et une expérience confirmée pour établir un modèle du système physique qui soit adapté à la fois au problème posé et à l'outil informatique de simulation retenu.

La modélisation peut ainsi être considérée comme un art, guidée en grande partie par l'expérience. Nous allons néanmoins essayer d'en proposer une structuration et de dégager certaines règles générales.

Le processus de modélisation peut se décomposer de la façon indiquée sur la figure III.1.

Détaillons chacune de ces phases :

III.3.1. Simplification du système physique

Un système de production revêt généralement une telle complexité qu'il est autant irréaliste qu'inutile d'en vouloir simuler les moindres détails de fonctionnement. Il est donc nécessaire, dans une première étape, de définir, pour chaque composant de l'atelier le degré de détail minimum nécessaire, compte tenu du problème global posé.

Cette phase de simplification peut également avoir à tenir compte des difficultés ou impossibilités à recueillir certaines données. Elle peut également tenir compte des limitations des outils informatiques dont on dispose.

Notons enfin, de façon un peu schématique, l'opposition classique entre l'homme de terrain qui, découvrant les possibilités de la simulation, veut tout simuler, et le modélisateur qui, conscient de ce que tel détail du système physique sous-entend comme complication dans la modélisation, a tendance à ne pas tenir compte.

Tout l'art de la modélisation est de trouver un bon compromis entre ces deux attitudes.

III.3.2. Modélisation logico-mathématique

Cette phase de modélisation consiste à représenter le comportement dynamique de l'atelier en le formalisant dans le cadre de l'outil informatique retenu. On peut noter qu'un certain nombre de langages de simulation (tels ARENA, MODLINE) proposent une représentation graphique de leur primitives, ce qui constitue une aide appréciable pour cette phase et peut devenir un outil de base pour le dialogue entre les différents intervenants concernés par le système de production.

III.3.3. Implémentation

Il s'agit de traduire le modèle logico-mathématique dans l'outil informatique sélectionné. Cette phase peut être plus ou moins lourde selon les degrés d'interaction et d'intégration de l'outil informatique utilisé.

III.4. EXPLOITATION D'UNE SIMULATION

Avant de voir comment on peut utiliser une simulation pour évaluer des scénarios, il est utile de rappeler le type de résultats que fournit une simulation.

III.4.1. Résultats issues d'une simulation

Les résultats qu'on attend d'une simulation représentent d'une manière abrégée ou détaillée le comportement dynamique du système de production et de ses différents composants.

Dans l'ordre croissant du niveau de détail, ces résultats pourront aller de valeurs moyennes de certaines variables d'état de l'atelier (files d'attente, occupation de ressources.) jusqu'à la liste exhaustive et ordonnée chronologiquement des événements qui ont eu lieu dans le système. Les uns seront utilisés par exemple pour déterminer les décisions immédiates d'une décision de pilotage. Ces résultats se présentent bien entendu sous des formes différentes selon le type de simulateur utilisé.

III.4.2. Evaluation de scénarios

La simulation est une technique qui consiste à formaliser les règles de fonctionnement d'un atelier et à étudier ses performances en fonction de règles de décisions ou de conduite des équipements. L'analyse de scénarios à travers la simulation est une démarche très générale qui peut s'appliquer par exemple au dimensionnement d'équipements, à la recherche de goulots d'étranglements, à l'amélioration de la fiabilité d'une installation ou encore à des problèmes plus courants tels que l'ordonnancement des ordres de fabrication. Dans ce dernier cas, la simulation peut permettre de répondre à diverses questions :

- choix des règles de décisions les mieux adaptées à la situation du moment en fonction des critères choisis,

- influence de politiques de modifications des capacités des moyens de production,

- évaluation de délais de livraison, etc...

On va alors étudier l'évolution du système en fonction du temps qui s'écoule ; chacun des critères significatifs sera évalué : retard, stock, temps de séjour, etc. On comprend alors aisément comment la simulation permet de tester différentes politiques d'ordonnancement (choix de règles de décisions) par l'analyse des différents critères retenus.

IV MODELISATION DE L'ATELIER

Le modèle de l'atelier est basé sur le concept de file d'attente et a été développé sur la base des critères suivants :

- avoir une structure simple.
- disposer d'une représentation graphique.
- être à la fois un outil de description et d'analyse.

Le modèle global de l'atelier est, en fait, constitué de trois sous-modèles :

- *un modèle du flux de produit* : basé sur un formalisme de réseaux de files d'attente, il décrit la circulation des flux de matière et d'informations dans le système de production.
- *un modèle du système physique* : il décrit la géométrie du système physique et représente les ressources du système de production ainsi que leur capacité et leur localisation dans l'espace.
- *un modèle de gestion des décisions* : il décrit les lois de commande et les règles d'allocation des ressources du système physique aux tâches en cours d'exécution.

Le modèle du flux de produit gère l'évolution de celui-ci tout au long de l'installation. Il fait appel au modèle de ressources qui assure le bon déroulement des tâches de production en fonction de la disponibilité des ressources en cours. Le gestionnaire de décision gère les ordres de fabrication, les allocations des ressources et les opérations de maintenance ; il est utilisé par les deux autres modèles

IV.1. LE MODELE DU FLUX DE PRODUIT

L'approche adoptée pour la modélisation de l'atelier est du type "top-down" et consiste à effectuer la description hiérarchique des fonctions de l'atelier du haut vers le bas. Ces fonctions sont modélisées par des actigrammes décrivant l'enchaînement des tâches. L'actigramme de plus haut niveau décrit l'enchaînement des fonctions principales de l'atelier (estérification, lavage, stripping). Les tâches qui le composent sont éventuellement décomposées sur plusieurs niveaux jusqu'à l'obtention du niveau de détail désiré.

IV.1.1. Les différentes composantes d'un actigramme

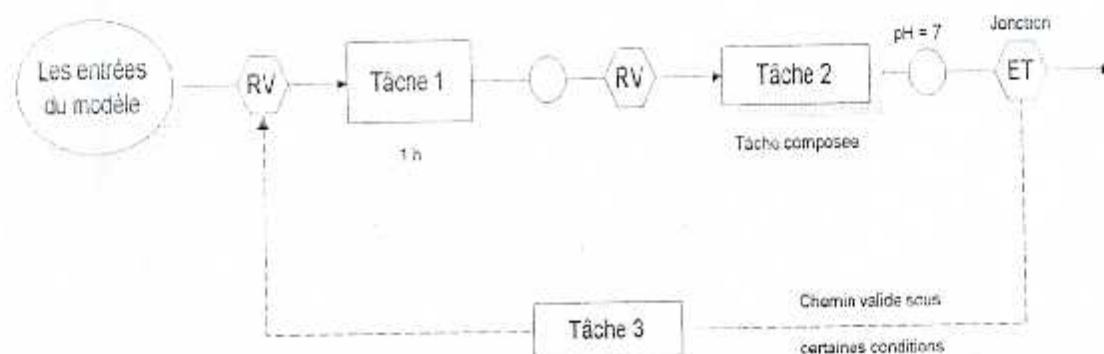


Figure IV.1 : Les composantes d'un actigramme

Le modèle de l'atelier est donc composé d'une hiérarchie de diagrammes appelés actigrammes qui expriment l'ordre d'exécution d'un ensemble de tâches participant à la réalisation d'une même fonction (voir annexe 4).

Un actigramme (figure IV.1) fait intervenir cinq types d'objets :

- les tâches,
- les liens,
- les jonctions,

- les états du produit,
- les données du modèle.

IV.1.1.1. Les tâches

Définitions :

Une tâche modélise une opération de transformation d'information ou de matière ; elle transforme des entrées en une sortie à l'aide d'un certain nombre de ressources. Les tâches sont représentées par des rectangles simples s'il s'agit de tâches élémentaires ou par des rectangles ombrés si elles sont décomposables ; les tâches sont décrites par les attributs suivants :

- *Identificateur* : c'est le nom de la tâche.

- *Etat* : il peut prendre les valeurs suivantes :

- *Active* : le produit est en cours de traitement par la tâche.
- *Inactive* : le produit n'est pas encore au stade de traitement décrit par la tâche, ou alors l'a dépassé.
- *Retardée* : le produit a atteint le stade de traitement décrit par la tâche mais celle-ci n'est pas encore réalisable (une ressource est indisponible par exemple).
- *Suspendue* : la tâche a, en cours de réalisation, été interrompue (par une panne ou sur décision de l'opérateur).
- *Achevée* : la tâche vient de s'achever normalement.

- *Préconditions* :

Il s'agit de conditions portant sur l'état des ressources et celui du produit et qui doivent être vérifiées avant que la tâche ne puisse être exécutée. Elles ont un caractère obligatoire : si elles ne sont pas vérifiées, la tâche est retardée.

- *Contraintes temporelles* :

Ce sont des contraintes temporelles qui doivent être, elles aussi, vérifiées pour pouvoir déclencher la tâche. Elles permettent d'exprimer des connaissances du type : « la réaction ne peut débuter que si l'on est sûr de pouvoir la finir avant le week-end » ou encore « la préparation de H_3PO_2 doit se faire au plus tôt deux à trois heures avant son chargement dans le réacteur ».

- *Durée* :

Il s'agit du temps nécessaire à l'exécution de la tâche. La prochaine section de ce document détaillera la méthode utilisée pour estimer ce paramètre important.

- *Ressources* :

C'est l'ensemble des ressources matérielles ou humaines nécessaires à l'exécution de la tâche.

- *Priorité* :

L'indice permet de gérer le conflit dans l'affectation des ressources à des tâches concurrentes. La tâche dont l'indice de priorité est le plus élevé sera prioritaire.

- *Conséquences :*

Précise les modifications à apporter au modèle de l'atelier suite à l'exécution de la tâche ; par exemple la réduction de la capacité d'un stockeur après une action de chargement de matières premières.

Critères de sélection des tâches du flux de produit

Lors de la génération du modèle, la sélection des tâches qui apparaissent dans le flux de produit de l'atelier pour un produit donné a été effectuée selon les critères suivants :

1- La dynamique de la tâche :

Il s'agit de comparer le temps nécessaire à l'exécution d'une tâche avec la durée globale d'un batch. On ne retiendra que les tâches dont la dynamique est significative par rapport à cette durée. Pour un batch de plusieurs dizaines d'heures, l'heure constituera la durée minimale des tâches retenues.

2. Le caractère limitatif de la tâche :

Certaines tâches exécutées dans l'atelier présentent un caractère plus limitatif que d'autres dans le sens où leur exécution conditionne la suite des opérations. Même si elles sont souvent de dynamique très courte, la présence de ces tâches dans le flux du produit est cruciale. Ces opérations concernent surtout les tests de qualité sur le produit (tests au laboratoire). Ainsi, selon que la densité dans le laveur est inférieure ou supérieure à une valeur critique de 0.87, les tâches à effectuer à la suite de ce test sont complètement différentes. Dans le premier cas, on procédera à un ajout de solvant alors que, dans le deuxième, on passera directement à la phase de neutralisation.

3. Le retard :

L'analyse du fonctionnement de l'atelier montre que certaines tâches, pour des raisons diverses, se sont avérées plus sujettes à des retards que d'autres. Ces retards fréquents dans la réalisation de certaines tâches, peuvent avoir plusieurs origines : manque de ressources, indisponibilité de matières premières, pannes, etc... Ces tâches constituent des goulots d'étranglement pour l'atelier et leur présence, dans le modèle du flux de produit, est indispensable à sa représentativité. A la différence des deux critères précédents, le retard n'est pas une donnée intrinsèque et varie en fonction de la gestion de l'atelier. L'ajout d'une ressource supplémentaire ou la modification d'une règle d'allocation des ressources existantes modifie considérablement la valeur de ce retard (jusqu'à le faire disparaître) et sa date d'occurrence.

IV.1.1.2. Les liens

Les liens dans l'actigramme marquent, en quelque sorte, des liens de préséance entre tâches. Une tâche en amont d'un lien devra être achevée pour que l'exécution de la (ou des) tâches en aval puisse(nt) débiter.

Deux types de liens sont représentés sur la figure IV.1. Le premier, en traits pleins désigne des liens dit *certain*, c'est-à-dire que les tâches pointées par ces liens ont lieu à chaque fois que le flux de produit les atteint. Les traits en pointillés représentent des liens dit *incertain* dont la réalisation est assujettie à des conditions qui sont souvent d'ordre probabiliste : c'est le cas, par exemple, d'un réacteur qui est nettoyé en moyenne une fois tous les quatre lots.

IV.1.3 Les jonctions

Une jonction décrit l'enchaînement des tâches lorsqu'il est plus complexe qu'une simple séquence. Les jonctions sont au nombre de quatre (figure I.2) :

ET : Toutes les tâches en aval de la jonction seront déclenchées simultanément.

OU : une et une seule tâche situé en aval sera déclenchée.

RV (Rendez Vous) : Toutes les tâches en amont doivent être terminées avant de déclencher la jonction.

OU : Au moins une tâche en amont doit être terminée pour déclencher la jonction.

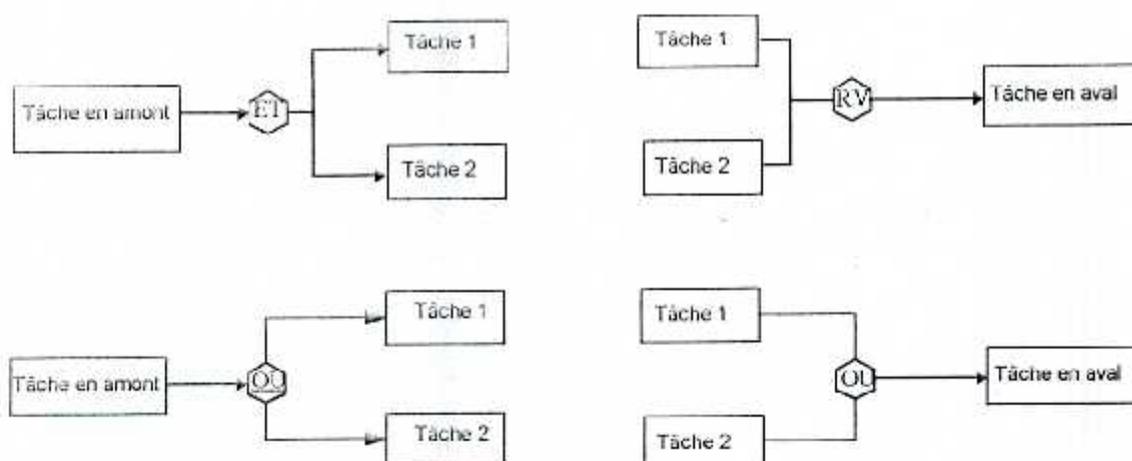


Figure IV.2 : Les différentes jonctions

IV.1.1.4. Les états du produit

Ils sont représentés par un cercle sur les actigrammes (voir figure IV.1). Ce concept sert à décrire l'état du produit après la réalisation de la tâche située en amont. La présence d'un cercle en aval d'une tâche signifie que celle-ci correspond à un traitement de matière (et non d'informations). Si, en outre, le

cercle est accompagné d'un libellé, ce dernier signale qu'une ou plusieurs propriétés du produit a changé de manière significative (les cercles libellés correspondent à priori à une mesure).

IV.1.1.5. Les données du modèle

Pour pouvoir être simulé correctement, le modèle du flux de produit a besoin d'un ensemble de données fourni en entrée par l'utilisateur. Ces données sont décrites par des ellipses dans l'actigramme de la figure IV.1. Dans le cas de l'atelier, ces données sont les suivantes :

1. Planning de livraison des matières premières :

Cet agenda fournit la date de réception des différentes matières premières ; il précise, en particulier, le type de la matière première à réceptionner ainsi que le tonnage.

2. Planning de fabrication :

Il spécifie dans le temps les ordres de fabrication d'un produit donné ; ce planning est défini pour chaque ligne de production dans l'atelier.

3. Planning de livraison des produits finis :

Il spécifie, pour chaque type de produit fabriqué et en fonction du batch réalisé, le type de conditionnement qui doit être effectué en fin de chaîne de fabrication. Il s'agira en particulier de préciser s'il s'agit d'enfûtage des produits finis ou de leurs stockage dans des réservoirs.

4. *Planning de livraison clients :*

Il précise la date à laquelle les clients doivent être livrés en produits finis. Outre la date, cet agenda précise également le type du produit livré ainsi que son tonnage.

IV.2. FLUX DE MATIERE ET FLUX D'INFORMATION

Il arrive souvent que, dans les ouvrages théoriques ou dans les travaux de recherche [4] [5] traitant de la modélisation d'entreprises industrielles, le flux de produit proprement dit soit séparé des tâches d'intervention sur les équipements de l'atelier. Cette approche est très utile pour la modélisation d'installations complexes pour lesquelles le calendrier de maintenance et d'intervention sur panne est très chargé. Dans le cas de sites industriels moins sujets à ce genre d'interventions tel que l'atelier, cette démarche perd de son intérêt. Il a donc été décidé de représenter dans le même modèle à la fois les opérations de transformation de la matière (flux de produit) et les interventions sur l'équipement (les opérations d'entretien). Ce choix est, d'autre part, motivé par un souci de faciliter la lecture et l'assimilation d'un tel modèle par l'ensemble des utilisateurs potentiels. Néanmoins si, dans le futur, le modèle de l'atelier s'élargissait et avait donc tendance à devenir plus complexe qu'il ne l'est aujourd'hui, la séparation entre le modèle de flux de produit et le programme de maintenance serait alors vivement conseillée.

IV.3. LE MODELE DES RESSOURCES

Sont regroupées dans ce modèle l'ensemble des ressources disponibles dans l'atelier qu'elles soient liées à la main d'œuvre ou au matériel. En synchronisant l'évolution du modèle de flux décrit dans la section précédente avec celui des ressources, la dynamique de l'atelier peut ainsi être décrite.

IV.3.1. Modélisation des ressources

Les ressources sont décrites par des variables statiques ou dynamiques :

Les variables statiques

- *Identificateur* :

Nom de la ressource

- *Loi de fiabilité* :

Ou loi de panne, établie selon les spécifications fournies par le constructeur ou d'après les résultats d'échantillonnage.

- *Qualité* :

Attribut qualitatif qui décrit la qualité de la ressource, en termes de fréquence de pannes, la ressource peut être *fragile* si elle tombe souvent en panne ou *robuste* dans le cas contraire.

- *Capacité* :

Précise le nombre d'unités disponibles dans la ressource. Une unité égale à 1 signifie que la ressource ne peut être engagée qu'une seule fois (c'est le cas de la majeure partie des ressources). Un nombre infini signifie que la ressource peut être engagée autant de fois que nécessaire ; elle est inépuisable. La source de vapeur dans l'atelier constitue un bon exemple de ressource partageable à volonté (plusieurs tâches utilisent simultanément cette ressource parallèle : l'estérification, le lavage, le stripping; ...).

- *Volume* :

Précise la capacité physique de la ressource si elle existe (exemple des stockeurs).

- *Intervention* :

Spécifie à quel moment la ressource devient effectivement indisponible, et cela par rapport à l'instant où elle est tombée en panne. Cet attribut peut prendre les valeurs suivantes :

Instantanée :

La tâche est alors immédiatement stoppée ; la ressource est immédiatement indisponible et attend d'être réparée. Une fois l'intervention achevée, la tâche reprend au point où elle a été interrompue.

Décalée :

Dans ce cas, l'intervention n'a lieu qu'une fois la tâche en cours est achevée.

Destruction :

Cette valeur indique que l'intervention est "instantanée" mais, qu'en plus, la tâche en cours est abandonnée et ne peut être reprise qu'une fois la ressource réparée.

- *Durée de l'intervention* :

C'est le laps de temps nécessaire pour la remise en marche ou pour le remplacement de la ressource défectueuse.

- *Effet de la panne* :

Décrit l'effet de la panne de la ressource engagée sur les tâches en cours dans l'atelier. Cet attribut peut prendre les valeurs suivantes :

Tâche :

C'est uniquement la tâche en cours qui est stoppée suite à la panne de la ressource engagée.

Ligne :

Dans ce cas, toute la ligne de production est stoppée.

Atelier :

C'est la cas le plus grave et tout l'atelier est arrêté.

Aucun :

La panne est mineure et elle n'a aucun effet sur les opérations en cours.

- *Type de partage* :

Précise si la ressource doit être partagée au niveau d'une ligne de production ou au niveau de l'ensemble de l'atelier, ou bien qu'elle n'est pas du tout partageable.

- *Règle d'allocation* :

Décrit la règle d'allocation de la ressource :

- FIFO : le premier demandeur est le premier servi
- LIFO : le dernier demandeur est le premier servi

- Priorité : la tâche qui a la priorité la plus élevée est la première servie.

Les variables dynamiques

- *Etat* :

Une ressource peut prendre les valeurs d'états suivantes : *engagée*, *libre* ou *défectueuse*.

- *Type* :

La ressource peut être *primaire* ou *secondaire*. Les ressources principales sont directement impliquées dans l'exécution d'une tâche. Les ressources secondaires ne sont pas directement impliquées dans l'exécution de la tâche en cours mais sont monopolisées par cette tâche (lorsqu'on livre le produit fini à partir des stockeurs, la filtration ne peut pas être effectuée).

- *Durée* :

Spécifie le temps pendant lequel la ressource est engagée pour la réalisation de la tâche en cours ; cette durée varie d'une tâche à l'autre.

IV.3.2. Sélection des ressources

Comme pour les tâches, les ressources figurant dans le modèle ont été retenues selon certains critères. Ils sont au nombre quatre :

1. *Critère de fiabilité* :

Les ressources dites "fragiles", c'est à dire avec des fréquences de panne assez élevées, figurent automatiquement dans le modèle des ressources.

2. Critère de partage :

Les ressources partageables dans l'atelier telles que les stockeurs, sont sélectionnées pour le modèle des ressources. Celles-ci se trouvent au cœur même du problème de l'allocation des ressources et constituent l'essentiel de la politique de gestion de l'atelier.

3. Critère de capacité :

Les problèmes liés aux ressources à capacité finie apparaissent aussi bien dans la gestion des stocks de l'atelier que dans le traitement des effluents liquides. Ces problèmes se trouvent à l'origine de nombreux retards dans la réalisation de certaines tâches et parfois même dans le lancement de campagnes de production. La présence des ressources à capacité finie dans le modèle des ressources est alors primordiale.

4. Critère d'impact :

Ce critère caractérise l'importance de la panne d'une ressource sur l'ensemble de l'installation. Certaines ressources sont très critiques et leur état de marche conditionne l'ensemble des opérations dans l'atelier. L'exemple du circuit d'eau réfrigérée peut ainsi être cité. En raison du caractère très limitatif et de la lourde conséquence que peuvent avoir les pannes de ce type de ressources sur l'ensemble de l'installation, il a été convenu de les faire figurer dans le modèle des ressources car elles permettent de modéliser les dysfonctionnements de l'atelier.

IV.4. ESTIMATION DES PARAMETRES

La composante temporelle du modèle du flux de produit est définie par les durées de ses différentes tâches. Pour minimiser les risques d'erreurs dans l'estimation de ces durées, une méthodologie a été élaborée pour les estimer de façon fiable. Basée sur l'étude statistique des données récoltées sur l'atelier, cette méthodologie pour calculer un bon estimateur de ces durées se veut une démarche rigoureuse et pratique. Cette approche repose sur les étapes suivantes, données dans l'ordre chronologique :

- 1) Récolte et traitement des échantillons statistiques
- 2) Analyse descriptive des échantillons
- 3) Simulation d'échantillons artificiels
- 4) Estimation de lois de probabilité
- 5) Estimation robuste
- 6) Estimation experte

Dans un premier temps, un échantillon débarrassé des valeurs jugées non représentatives (étapes 1 et 2) est construit à partir des données. Le problème consiste à estimer la loi de distribution de la population des durées à partir de cet échantillon. Si la taille de l'échantillon est suffisante, le raisonnement portera sur la moyenne de l'échantillon dont les lois de probabilité sont données par le théorème central-limite [6]. Dans le cas contraire, il faudra estimer une loi de probabilité pour l'échantillon des données collectées, si elles existent (étape 4). Enfin, si l'estimation de ces lois n'est pas possible, les

caractéristiques de l'échantillon seront alors résumés dans des estimateurs robustes indifférents aux lois hypothétiques dont est issu l'échantillon (étape 5).

Dans le cas où on ne dispose d'aucune donnée, on considère une durée de la tâche estimée par les experts (étape 6).

IV.4.1. Récolte et traitement des échantillons



Le but de cette étape est de construire les échantillons nécessaires à l'estimation des durées des tâches définies dans le schéma du flux de produit. La construction de ces échantillons est effectuée en dépouillant les fiches de suivi des différents batches réalisés depuis le début de l'activité dans l'atelier. Le traitement d'un échantillon consiste à le réduire à une période où les observations présentent une certaine périodicité ou varient autour de valeurs moyennes. En d'autres termes, il vise à réduire la taille de l'échantillon à la période où l'atelier est devenu stable et éliminer la période instable correspondant à la phase de démarrage de l'atelier. La figure IV.3 illustre ce cas sur l'exemple de la filtration dont l'évolution au cours du temps des durées de la filtration laisse apparaître une période d'instabilité allant du batch n°1 (démarrage de l'unité) jusqu'au batch n° 25. Dans la suite de l'étude, on se limitera aux valeurs de l'échantillon postérieures au batch n°25.

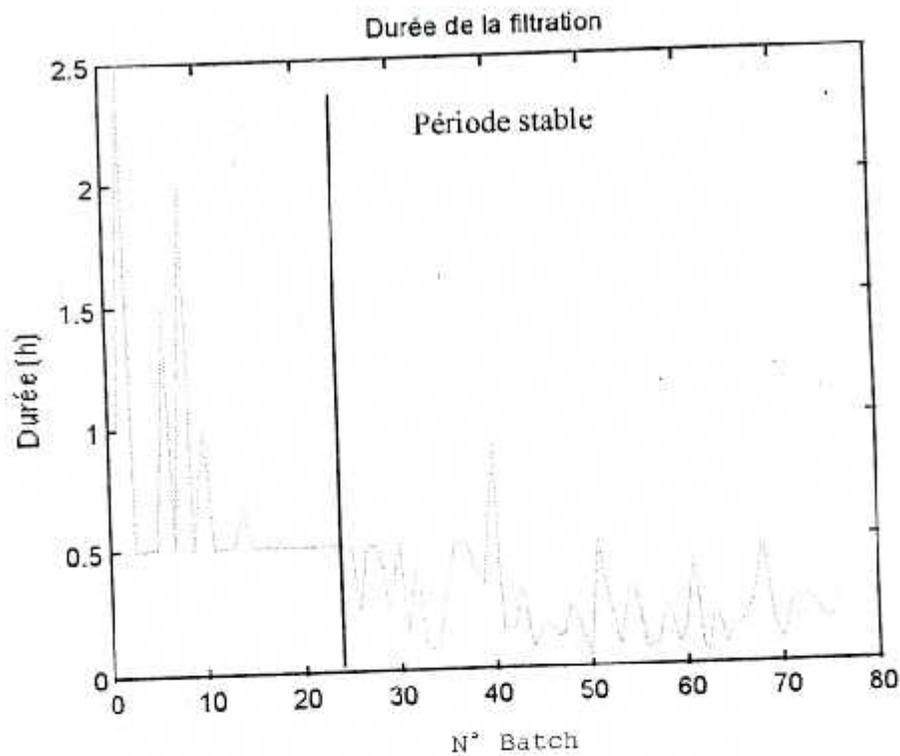


Figure IV.3 : Exemple de réduction d'un échantillon aux périodes stables
(cas de la filtration)

IV.4.2. Analyse descriptive

Le diagramme en *boîte* ou *box-plot* proposé par J. W. Tuckey [7] représente schématiquement les principales caractéristiques d'une variable numérique aléatoire (voir figure IV.4). Il est basé sur le concept de *quartile*. Les quartiles sont au nombre de trois : Q_1 , Q_2 et Q_3 , et sont définis par $F(Q_1) = 0.25$, $F(Q_2) = 0.5$ et $F(Q_3) = 0.75$, F étant la fonction de probabilité définie par :

$$F(a) = \text{Proba}(X \leq a) = \int_{-\infty}^a p(x) dx$$

p étant la fonction de densité de probabilité de la variable aléatoire X .

La partie centrale de la distribution est représentée par une boîte dont la longueur correspond à l'intervalle interquartile $Q_3 - Q_1$ (la largeur de la boîte n'a

pas de signification). On trace à l'intérieur de la boîte la position de la *médiane* correspondant à la valeur du quartile Q_2 . Les traits obliques de part et d'autre de la médiane donnent une approximation de l'intervalle de variation de la médiane.

La boîte est alors complétée par des "moustaches" correspondantes aux valeurs adjacentes suivantes :

- Adjacente supérieure : plus grande valeur de l'échantillon inférieure à $Q_3 + 1.5(Q_3 - Q_1)$
- Adjacente inférieure : plus petite valeur de l'échantillon supérieure à $Q_1 - 1.5(Q_3 - Q_1)$

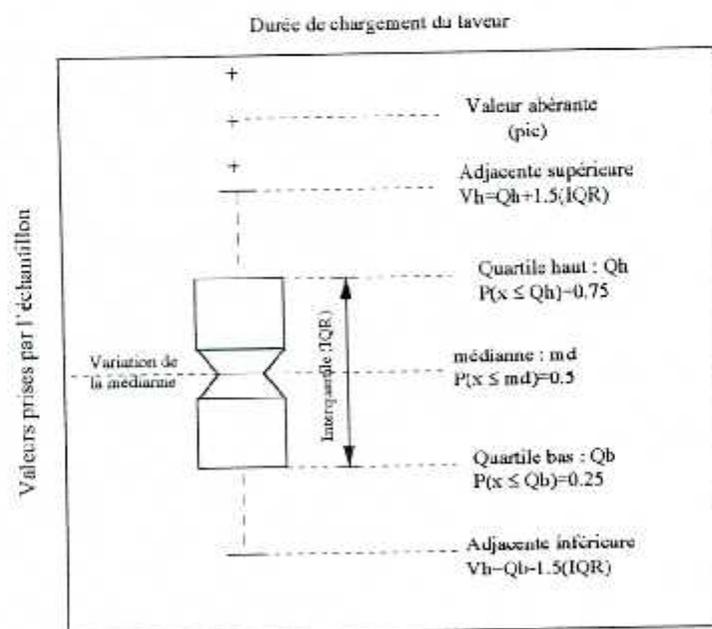


Figure IV.4 : Exemple d'une "box-plot" (chargement du laveur)

Les valeurs extérieures à ces adjacentes, représentées sur la figure IV.4 par les "+" à l'extérieur des adjacentes, sont celles qui sortent des "moustaches" ; elles sont considérées comme d'éventuelles valeurs anormales.

L'analyse descriptive des échantillons permet avant l'étape d'estimation analytique, de saisir rapidement les caractéristiques d'un échantillon (valeur médiane, symétrie, ...) mais également de visualiser les valeurs aberrantes, appelées *pics statistiques*. Il faut alors, soit les corriger en identifiant leur cause, soit les éliminer. Les causes possibles de ces pics sont, dans l'atelier, nombreuses ; elles peuvent cependant être classées en trois catégories :

- Erreur d'écriture de la part de l'opérateur,

- Panne d'équipement,

- Défaillance humaine,

Si aucune explication ne permet de justifier ces écarts extrêmes, les pics sont éliminés de l'échantillon pour ne garder que les valeurs réellement significatives. Dans le cas contraire, elles seront corrigées.

IV.4.3. Simulation d'échantillons artificiels

Dans tous les cas, les échantillons dans l'atelier sont de trop petite taille pour que le théorème central limite puisse s'appliquer. La réduction aux périodes stabilisées et l'élimination des pics statistiques réduisent considérablement la taille des échantillons observables sur l'atelier (quelques dizaines d'individus au maximum). Pour pouvoir émettre des hypothèses raisonnables sur la loi de distribution d'une durée, l'échantillon est enrichi artificiellement par simulation (on dope l'échantillon). Il s'agit simplement d'un

artifice de calcul qui permettra d'émettre une hypothèse sur la loi, la vérification de l'hypothèse et la détermination de ses paramètres, le test du χ^2 se faisant ensuite sur l'échantillon réel.

L'idée de cette méthode due à B. Efron [7] repose sur le principe élémentaire suivant : si n est grand, F_s (fonction cumulative de l'échantillon simulé) est proche de F (fonction cumulative de l'échantillon réel), l'hypothèse sur la loi de distribution de l'échantillon, en utilisant F_s à la place de F , sera donc convenable.

On est donc amené à tirer des échantillons de n valeurs dans la loi F , ce qui revient à rééchantillonner dans l'échantillon initial (x_1, x_2, \dots, x_n) , c'est-à-dire à effectuer des tirages avec remise de la valeur tirée parmi les n valeurs observées, chaque valeur étant supposée équiprobable. Le nombre de tirages doit être un multiple de n , de façon à obtenir m vecteurs de tailles n . On garantit ainsi que chaque valeur garde une probabilité de réalisation égale à $1/n$. La population simulée est constituée de ces $m.n$ valeurs (on n'intègre pas l'échantillon de base).

La figure IV.5 représente l'échantillon réel de la durée de chargement du laveur et celle de l'échantillon simulé. La deuxième courbe montre un resserrement des valeurs autour d'une valeur moyenne difficilement perceptible dans la courbe initiale.

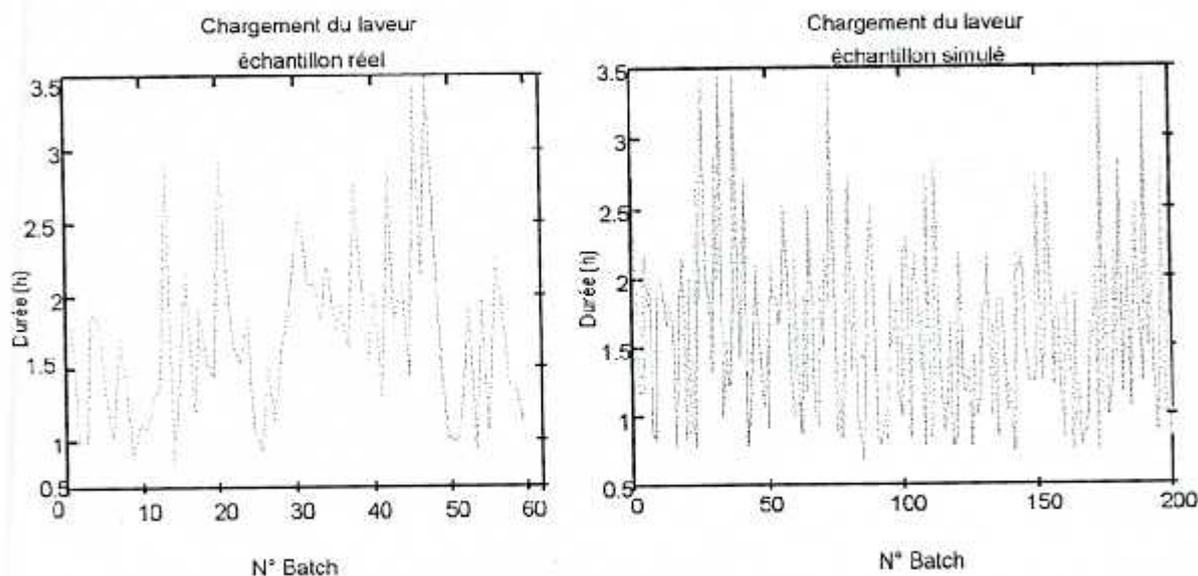


Figure IV.5 : Exemple d'échantillon réel et d'échantillon simulé

IV.4.5. Estimation des lois de probabilité

Cette étape a pour but d'émettre des hypothèses sur la loi de distribution de la population dont est issu l'échantillon étudié. Il s'agit, en fait, de supposer que la population suit l'une des distributions usuelles [6]. L'étude descriptive de l'échantillon permet, dans un premier temps, de sélectionner quelques lois possibles. Des tests statistiques permettent ensuite d'infirmer ou de valider ces hypothèses avec un certain risque d'erreur et, dans le dernier cas, de retenir l'hypothèse la plus plausible.

IV.4.5.1. Sélection des lois de probabilité

Avant de décrire les tests statistiques les plus courants, il convient de présenter brièvement les procédures empiriques qui permettent de s'orienter vers une loi de distribution adaptée aux données observées.

- La forme de l'histogramme :

On entend par histogramme la courbe des fréquences d'occurrence d'une variable aléatoire par classe de valeurs. On assimile cette courbe à une fonction de densité de probabilité (par lissage). La forme de cette courbe peut conduire à éliminer certains modèles, en particulier si les propriétés de symétrie ne sont pas vérifiées. Une forme symétrique conduit souvent à poser l'hypothèse de la normalité, mais il faut se souvenir que la loi normale n'est pas la seule à avoir une courbe de densité en cloche : c'est également le cas, en particulier, des lois de Cauchy et de Student[7].

Une forme fortement dissymétrique peut suggérer l'usage de lois Log-normale, Gamma ou de Weibull qui présentent des variations de densité assez proches.

Le choix entre différentes distributions de formes semblables doit s'effectuer en tenant compte du phénomène étudié : ainsi, en fiabilité, on se limitera aux lois exponentielles ou de Weibull qui ont une justification physique alors que la loi log-normale n'en possède pas dans ce cas [6].

- Vérification de certaines propriétés mathématiques :

On vérifie sur l'échantillon que certaines relations concernant les paramètres d'un modèle sont vraies. Ainsi, pour une loi de Poisson, la moyenne est égale à l'écart-type : sur un échantillon la moyenne estimée doit donc différer peu de l'écart-type estimé. Pour une variable de Gauss, le coefficient d'aplatissement de cette loi doit être égal à 3 et son coefficient d'asymétrie doit être nul. On vérifiera sur l'échantillon que les coefficients empiriques correspondants s'écartent peu des valeurs théoriques : des tables donnant les valeurs critiques de ces coefficients pour différentes tailles d'échantillon sont, pour cela, disponibles [7]. De telles constatations sont seulement un indice du caractère normal d'une distribution mais ne sont nullement une preuve. La véracité d'un

modèle ne peut d'ailleurs jamais être prouvée par des moyens statistiques. Un modèle est choisi pour sa commodité et pour sa faculté à représenter un phénomène [6].

IV.4.5.2. Les tests statistiques

Une fois choisie une loi de distribution pour l'échantillon, les tests statistiques ont pour but de valider ce choix. Ils permettent de vérifier qu'un échantillon peut être extrait ou non d'une variable aléatoire de distribution connue $F_0(x)$.

Soit $F(x)$ la fonction de répartition de la variable échantillonnée ; il s'agit de tester l'hypothèse H_0 , dite nulle, $F(x) = F_0(x)$, contre l'hypothèse contraire H_1 , $F(x) \neq F_0(x)$.

Le test le plus classique, celui du χ^2 (Lawrence 90), sera présenté ici.

Le test du χ^2

Soit une variable aléatoire X , discrète ou discrétisée, c'est-à-dire divisée en K classes de probabilités p_1, p_2, \dots, p_k . Pour valider l'adéquation d'une telle variable à une loi de distribution connue on adoptera la démarche du test du χ^2 suivante :

1/ On commence par calculer la statistique D :

$$D = \sum_{i=1}^{i=K} \frac{(n_i - np_i)^2}{np_i}$$

avec :

n : Taille de l'échantillon

n_i : Nombre d'occurrences de la classe K_i .

p_i : Probabilité de réalisation de la classe K_i , calculée à partir de la loi de probabilité hypothétique.

2/ On fixe alors le seuil d'erreur α (de 2.5% à 10%) correspondant au risque d'erreur commis en acceptant l'hypothèse nulle.

3/ On calcule ensuite la valeur θ telle que :

$$P(\chi^2_{K-\beta-1} > \theta) = \alpha$$

où $\chi^2_{K-\beta-1}$ est une loi de Chi-deux à $K-\beta-1$ degrés de liberté, β étant le nombre de paramètres estimés (2 pour la loi normale, 1 pour la loi exponentielle, ...). La valeur de θ doit être recherchée dans les tables de la Chi-deux.

4/ Enfin :

si $D \geq \theta$, le choix de la distribution est considéré comme erroné (H_0 est rejetée)

si $D < \theta$, l'hypothèse H_0 est acceptée, le choix de la distribution est considéré comme justifié avec une probabilité $(1 - \alpha)$.

Dans le cas où le test s'avère négatif même pour des valeurs élevées de α pour l'ensemble des lois possibles, il faut envisager une estimation robuste des principaux paramètres de l'échantillon.

IV.4.6. Estimation robuste

La théorie classique de l'estimation permet de déterminer les estimateurs optimaux pour une famille de lois de probabilité définie à l'avance. Ces estimateurs dépendent en général fortement de la loi supposée : si celle-ci n'est pas correcte, les estimateurs ne le seront pas. On peut donc chercher des classes d'estimateurs relativement insensibles à priori à des modifications des lois: c'est un premier type de robustesse. Un deuxième type de robustesse concerne l'insensibilité à des valeurs "aberrantes" : la moyenne arithmétique est sans doute le meilleur estimateur de l'espérance pour une vaste classe de lois mais elle est très sensible aux valeurs extrêmes.

Lorsqu'aucune loi pour la distribution de la population ne peut être estimée à partir de l'échantillon disponible, il devient difficile de modéliser cette population. Une première méthode pourrait consister à prendre comme modèle l'échantillon lui-même, chacune de ses valeurs étant équiprobables. L'inconvénient de cette démarche est qu'elle risque d'inclure dans le modèle des valeurs aberrantes sans qu'aucune explication ne puisse être fournie. Il a donc été préféré de caractériser cette population par des estimateurs robustes de sa tendance et de sa dispersion.

La tendance et la dispersion sont des descripteurs qualitatifs d'un échantillon [6]. La tendance définit une valeur centrale autour de laquelle se répartissent les n valeurs d'un échantillon alors que la dispersion caractérise la manière dont les valeurs se répartissent autour de cette valeur centrale.

IV.4.6.1. Estimateur robuste de la tendance

La moyenne arithmétique d'un échantillon est très sensible aux valeurs extrêmes : on obtient un estimateur plus robuste de la tendance en éliminant les valeurs extrêmes. On appelle ainsi moyenne tronquée d'ordre α la moyenne arithmétique obtenue en éliminant les αn plus grandes et plus petites valeurs.

La médiane est le cas extrême d'une moyenne tronquée ($\alpha = 50 \%$, c'est-à-dire que la moyenne est calculée sur la moitié de l'échantillon) et il s'agit d'un estimateur très robuste de la tendance.

La médiane correspond à la valeur M d'un échantillon telle que $F(M) = 0,50$.

IV.4.6.2. Estimateur robuste de la dispersion

Plus encore que la tendance centrale, la dispersion constitue une notion clé en statistique car, si tous les individus d'un échantillon avaient la même valeur, il n'y aurait plus de raisonnement statistique (Saporta 89)...

Un estimateur robuste de la dispersion est l'intervalle interquartile. Les quartiles Q_1 , Q_2 et Q_3 étant définis par $F(Q_1) = 0,25$, $F(Q_2) = 0,50$ et $F(Q_3) = 0,75$, $Q_3 - Q_1$ représente l'intervalle interquartile.

IV.4.6. Estimation "experte" de certains paramètres

Certains des paramètres du modèle de flux de produit, en particulier la fréquence et la durée des interventions des opérateurs humains dans l'atelier, sont très difficiles et parfois impossibles à échantillonner. Pour cette raison, il a été procédé à la récolte d'informations auprès des différentes personnes travaillant dans l'atelier (opérateurs, chefs de poste, ingénieur de production,...). Ces informations, de sources diverses, ont été comparées entre elles pour fournir une estimation dite "experte" de ces paramètres.

V. ETUDE COMPARATIVE DES PRODUITS COMMERCIAUX DE SIMULATION

V.1. INTRODUCTION

Les exigences de la compétition industrielle poussent les décideurs à mettre en place des systèmes de production de plus en plus complexes et coûteux. Pourtant, même si le temps consacré aux phases d'étude et de conception se trouve en constante augmentation, les erreurs commises restent encore nombreuses.

C'est trop souvent après l'investissement que l'atelier réalisé disposera de trop ou de pas assez de machines ou que les stockages prévus se révéleront sur ou sous-dimensionnés.

Parmi les techniques d'analyse de systèmes complexes, la simulation connaît depuis plusieurs années un engouement particulier. Un nombre croissant d'industriels la considère comme l'un des outils les plus performants pour la conception, la mise au point et l'aide à l'exploitation de sites industriels. Ce n'est plus, comme par le passé, la technique de la dernière chance, mais un outil indispensable pour les concepteurs, les ingénieurs et les managers.

La crédibilité d'une simulation repose sur le fait que le modèle est construit à partir d'expériences effectuées sur le système réel plutôt qu'à partir d'approximations théoriques qui ont tendance à simplifier grandement certains aspects du problème. Ainsi :

- Les implantations physiques (manutention, machines, stocks), le dimensionnement des ressources (hommes, moyens de production,

outillages) et les systèmes logistiques peuvent être testés avant investissement.

- Les goulots d'étranglement et autres blocages, souvent pressentis grâce à l'expérience, deviennent identifiables et surtout quantifiables.
- Les réactions du système, face à certains phénomènes aléatoires, peuvent être envisagées et maîtrisées.
- L'occurrence d'événements peut être contrôlée ; les événements rares peuvent être étudiés finement grâce à de multiples répétitions de leur déroulement.
- De nouvelles structures organisationnelles ou règles de gestion, peuvent être testées sans perturber le fonctionnement de l'atelier.

Malgré des avantages nombreux, la simulation présente néanmoins des limites. Certaines sont dues à la technique elle-même, d'autres sont liées aux produits actuellement disponibles sur le marché :

- La construction des modèles de simulation demande un certain niveau d'expertise. La qualité des résultats est intimement liée à celle de la modélisation et au savoir-faire du modélisateur. Très rapidement on comprend que la modélisation est un métier.
- Cela peut paraître surprenant, mais la simulation n'est pas au sens propre une technique d'optimisation. Elle ne peut qu'établir les performances d'une solution conçue et imaginée par l'utilisateur. Il s'agit d'une technique entièrement itérative qui ne propose pas de solutions finales mais qui permet seulement à l'utilisateur d'envisager et de tester l'arborescence des choix possibles.
- Les résultats de simulation sont souvent complexes à interpréter. On étudie, en effet, des phénomènes aléatoires et les techniques d'analyse demandent de la

rigueur; il est donc souvent difficile de faire la part du crucial et celle de l'anecdotique.

- On se doit d'aller aussi vite que possible vers la solution finale sans passer trop de temps à explorer une multitude de solutions intermédiaires.

Deux grandes familles de produits se disputent aujourd'hui le marché de la simulation des sites industriels qui se trouve en constante progression :

- Des produits simples d'emploi qui ont axé leur développement vers l'hyper-confort de l'utilisateur. Ces produits ont malheureusement trop souvent négligé l'aspect simulation proprement dit et la qualité des résultats obtenus est souvent insuffisante. Leur simplicité d'utilisation devient alors source d'erreurs, l'utilisateur laissant le logiciel décider pour lui sans être toujours certain que la modélisation reste fidèle à la réalité [8].
- Des produits plus complexes qui permettent une modélisation fine et détaillée du processus mais qui demandent une connaissance approfondie du logiciel utilisé. L'investissement initial en formation est alors plus lourd et la population capable d'utiliser les fonctionnalités mises à leur disposition plus réduite.

Ces dernières années, l'écart entre ces deux types de produits s'est réduit. Les simulateurs conviviaux ont rajouté de nouvelles fonctionnalités alors que les simulateurs les plus puissants ont travaillé leur interface utilisateur.

Actuellement, si l'on excepte quelques simulateurs complètement dédiés à un type d'application très spécifique, les logiciels commerciaux fournissent tous des fonctionnalités très génériques qui cherchent à répondre à des besoins bien différents, à charge de l'utilisateur de savoir au mieux les adapter à son problème.

C'est cette catégorie de simulateurs qui nous intéresse et l'étude comparative réalisée a porté sur quelques logiciels les plus représentatifs de cette classe.

Avant de présenter les résultats de cette étude comparative, il convient tout d'abord de préciser les conditions dans lesquelles s'est déroulée cette étude et d'expliquer brièvement les critères sur lesquels les différents produits ont été testés.

V.2. REMARQUES GENERALES CONCERNANT L'ETUDE COMPARATIVE

Même si cette étude a été rendue aussi objective que possible, il convient néanmoins de préciser que tous les logiciels participants à ce test n'ont pas été traités sur un même pied d'égalité et, cela, pour les trois raisons suivantes :

1- Ne disposant pas de l'ensemble des logiciels présents dans ce comparatif, nous n'avons pu mener nos investigations que sur les versions qu'ont bien voulu mettre gracieusement à notre disposition les différents fournisseurs. Cela étant dit, la version mise à notre disposition varie d'un fournisseur à un autre, de la simple disquette de démonstration jusqu'à la version commerciale complète, documentation comprise. Il est facile de deviner que, dans ce dernier cas, l'investigation a été plus objective et plus fiable que dans le cas de la mise à notre disposition d'une simple version de démonstration.

2- L'étude comparative des différents logiciels a été essentiellement basée sur notre connaissance des problèmes d'ordonnement. Ceci sous entend qu'aucun modèle réel n'a été testé sur l'ensemble des logiciels pour comparer les résultats obtenus. Ce handicap est essentiellement dû au fait que les versions d'évaluation mises à notre disposition ne permettent pas de mener une telle étude; il aurait fallu disposer des différents logiciels ce qui n'était pas le cas.

3- Enfin, outre les logiciels eux mêmes qui ont servi de banc d'essai pour cette étude, ont servi de base, pour l'évaluation de certains critères, quelques références bibliographiques traitant de certains logiciels [9][2]. Ces références traitent surtout des logiciels les plus anciens qui ont déjà conquis le monde universitaire [2].

V.3.LES CRITERES D'EVALUATION

L'étude comparative a été réalisée dans le sens de la problématique propre de l'atelier, c'est à dire celle de l'emploi de logiciels de modélisation/simulation à des fins d'ordonnement tout en tenant compte des particularités de l'atelier (fabrication par lots, atelier multi-produits, ...).

Dans cette optique, un certain nombre de critères de comparaison des différents logiciels ont été définis. Ces critères ont été retenus en fonction de leur pertinence par rapport au problème traité, puis regroupés dans six catégories. La première catégorie est réservée aux critères liés aux différents aspects de la "modélisation" de l'atelier : flux de produits, gestion des ressources, etc... La seconde catégorie concerne les aspects temporels et les traitements qui leur sont réservés. On s'intéresse dans la troisième catégorie aux capacités des logiciels à traiter des problèmes d'ordonnement. La quatrième catégorie décrit les capacités des différents logiciels à développer des applications adaptées aux problèmes traités. Il a par ailleurs semblé intéressant de dédier une catégorie particulière à l'ergonomie de chacun des logiciels. Enfin, une dernière et sixième catégorie est consacrée à des informations supplémentaires telles que le prix, les références et l'environnement de chacun des produits testés.

V.3.1. Aspect modélisation

Il s'agit du premier aspect intéressant pour l'évaluation d'un produit commercial. Il concerne les possibilités de modélisation qu'offre le produit considéré pour la représentation d'un modèle de flux de produit ainsi que pour celle du modèle des ressources.

1. Modélisation hiérarchique :

On s'intéresse ici aux possibilités de modélisation hiérarchique de chacun des logiciels, c'est à dire à leur aptitude à décomposer le modèle global en un ensemble de sous-modèles, et ceci autant de fois que le nécessitera la complexité de l'atelier modélisé.

2. Schéma du flux de produit :

La capacité d'un logiciel à modéliser le comportement de l'atelier sous la forme d'un actigramme est une présentation particulièrement intéressante car elle permet d'implémenter directement le flux de produit tel que défini antérieurement. Il n'est ainsi pas nécessaire d'adapter la perception du problème aux méandres de la programmation que nécessitent certains logiciels.

3. La gestion des ressources :

Comme elle se trouve au cœur des problèmes d'ordonnancement, il sera à chaque fois précisé si le logiciel testé comprend ou non un gestionnaire de ressources permettant de gérer l'allocation des ressources en cas de conflit.

4. Niveau de détail :

Il s'agit des degrés de liberté dont dispose le modélisateur pour adapter le logiciel au problème traité. En effet, le niveau de détail requis n'est pas toujours le même selon l'utilisateur final. Les données nécessaires au responsable de production pour l'ordonnancement d'une ligne sont plus fines et plus précises que celles dont devra disposer le manager qui désire valider en première approche une décision stratégique. Ce dernier critère, très important, permet de mesurer la flexibilité et l'évolutivité d'un logiciel et de distinguer les outils de bas niveau, souples et génériques, des outils de haut niveau, difficilement adaptables à des besoins spécifiques.

V.3.2. Aspect temporel

La composante temporelle se trouvant au cœur des efforts de modélisation pour la résolution des problèmes d'ordonnancement et de gestion de ressources, il a été décidé d'accorder une importance particulière à la manière dont les différents logiciels gèrent cette composante.

1. Calendrier d'événements :

On s'intéresse ici à la manière dont les différents événements sont traités. On indiquera en particulier si le logiciel supporte les événements implicites, explicites, ou les deux à la fois. On précisera également s'il est possible, en cours de simulation, de programmer des événements de manière dynamique.

2. Loi de probabilité :

Ce critère est très important pour l'étude des différents paramètres du modèle de l'atelier ; il n'est malheureusement pas prévu dans tous les logiciels ou bien s'il l'est, c'est dans une très faible mesure.

3. Analyse statistique :

Il s'agit de la possibilité qu'ont certains outils d'analyser à l'aide de programmes internes les résultats obtenus à la fin de la simulation et d'en déduire automatiquement des lois de distribution. Cette option est très utile dans le cas où sont simultanément réalisées plusieurs simulations (ceci est très fréquent en ordonnancement). Ainsi serait épargné à l'utilisateur l'effort de mener des investigations statistiques pour évaluer les résultats des simulations.

V.3.3. Aspect ordonnancement

Certains logiciels du commerce anticipent sur les besoins des utilisateurs et fournissent en standard (ou en option) des outils spécifiques dédiés à l'ordonnancement.

1. Algorithme d'ordonnancement :

Dans ce cas, le logiciel dispose d'un algorithme qui permet d'optimiser l'enchaînement des différentes tâches de l'atelier afin de répondre au mieux à un critère établi par l'utilisateur. Les critères les plus utilisés sont par exemple la durée globale, la date au plus tôt ou bien encore une fonction de coût.

2. Diagramme de Gantt :

Cet outil permet de représenter les résultats de la simulation sous la forme d'un planning de production qui inclut le planning des opérations et celui des ressources. En utilisant un jeu de couleurs, il est possible de distinguer sur ce planning les tâches exécutées, les opérations en retard, les ressources engagées et d'autres informations susceptibles de faciliter l'interprétation des résultats de la simulation.

V.3.4. Aspect développement d'applications

Le problème de l'ordonnancement et de l'optimisation de l'atelier, en particulier, ainsi que celui de l'industrie batch, en général, fait intervenir des concepts propres à ce type d'industrie (Rosenof 87)[10]. En particulier, plusieurs tâches peuvent être réalisées sur une même ressource, et les transferts continus monopolisent simultanément la ressource amont et la ressource aval. Il serait utile, dans ce cas, de pouvoir disposer de logiciels génériques pour les adapter aux spécificités de l'industrie batch. Il est intéressant de savoir lesquels parmi ces logiciels, initialement développés pour l'industrie manufacturière, offrent des possibilités réelles pour pouvoir traiter des problèmes tels que celui de l'atelier.

1. Définition de bibliothèques de modèles :

Ceci concerne les possibilités qu'offrent les différents logiciels à définir des classes de modèles adaptées aux procédés batch. Celles-ci constituent ce qui est communément appelé "bibliothèque de modèles" qui permet de créer les modèles les mieux adaptés et les plus souvent utilisés pour la résolution d'un problème donné. Ces modèles sont définis de manière générique, ce qui autorise leur utilisation dans différents endroits d'un même modèle ou dans différents modèles (lorsque sont traités différents produits), affranchissant du même coup l'utilisateur de tâches répétitives.

2. Développement d'interfaces :

On précise si le logiciel permet à l'utilisateur de créer une interface propre à l'application qu'il veut développer. En créant sa propre interface, le développeur pourra personnaliser le logiciel et le rendre ainsi plus abordable à des utilisateurs finaux non experts.

3. Programmes externes :

Ce critère mesure les possibilités d'ouverture du logiciel sur des programmes externes. Cette ouverture permet d'adapter le logiciel aux besoins spécifiques de l'utilisateur en développant des solutions particulières codées dans des programmes externes. Il s'agira ensuite d'interfacer ces programmes avec le simulateur principal. Cette option permet également une ouverture vers les données déjà disponibles ou en cours de collecte sur l'atelier modélisé. L'utilisateur n'est donc pas limité par les fonctionnalités de base du logiciel mais peut enrichir le produit et/ou générer son propre simulateur.

V.3.5. Aspect ergonomique

L'ergonomie des logiciels n'est plus, de nos jours, seulement un artifice mais constitue un argument de choix non négligeable et un nombre croissant de développeurs en font aujourd'hui leur cheval de bataille. Un bon logiciel doit être un logiciel ergonomique et son apprentissage ou sa maîtrise ne doivent plus nécessiter que quelques heures de formation.

1. Animation/visualisation :

De nos jours les logiciels commerciaux ne peuvent s'affranchir de fournir à l'utilisateur une interface graphique qui lui permet de d'inter-agir d'une manière souple et conviviale avec le programme. De la qualité de cette interface et de sa richesse d'animation dépend le temps que doit consentir un utilisateur pour s'initier à l'utilisation d'un produit commercial. Il est d'ailleurs établi que, si la simulation est une technique très puissante, l'animation/visualisation augmente encore son pouvoir de résolution tout en procurant un grand confort de travail.

2. Documentation :

Un maillon essentiel pour l'apprentissage et la manipulation d'un logiciel est constitué par la qualité de la documentation qui améliore sensiblement les possibilités d'apprentissage et réduit l'investissement en temps nécessaire à sa mise en oeuvre.

3. *Prise en main* :

Ce critère quantifie l'investissement en temps que doit consentir un nouvel utilisateur pour profiter pleinement des possibilités offertes par le logiciel. Même si l'évaluation de ce critère est très subjective, il a, néanmoins, semblé utile de faire figurer ce critère parmi les qualités ergonomiques d'un logiciel.

V.3.6. Informations annexes

Cette rubrique regroupe des informations annexes concernant les logiciels telles que le prix, le nombre de références et le matériel sur lequel est implanté le logiciel. Même si ces données sont considérées comme des informations annexes, elles constituent cependant des critères de choix importants et permettent de trancher entre deux logiciels de qualité voisine.

V.4. RESULTATS DE L'ETUDE

Les résultats de l'étude sont regroupés dans le tableau de la figure V.1.

V.5. CHOIX ET STRATEGIE

Cette étude comparative permet de dégager deux voies possibles pour l'implémentation du modèle de l'atelier:

- 1- Tester parmi ces logiciels celui qui répond le mieux aux exigences de la modélisation de l'atelier .
- 2- Développer en interne un simulateur spécifique de l'atelier.

Vu la complexité de l'atelier, la deuxième solution entraînerait un investissement en temps considérable. L'intérêt des techniques de simulation discrète pour les problèmes d'ordonnancement et de planification d'ateliers batch est encore en phase d'évaluation, et un tel investissement ne se justifie pas pour l'instant.

Parmi les logiciels cités dans ce comparatif, ARENA semble le mieux approprié. Il satisfait en effet à l'ensemble des critères retenus pour cette étude comparative. A ce stade, il semble donc judicieux d'évaluer la validité du modèle de l'atelier en l'implémentant sous ARENA. Cette expérience permettra d'autre part de juger de la pertinence de l'approche simulation pour l'optimisation de l'atelier.

Tableau V.1 : Résultats de l'étude comparative

Nom du Produit	MODELISATION					ASPECTS TEMPORELS				ORDONNANCEMENT	
	Modélisation hiérarchique	Schéma du flux produit	Gestion des ressources	Niveau de détail	Calendriers d'événements	Lois de probabilité	Analyse statistique	Diagramme de Gantt	Algorithme d'ordonn.		
PROCESS	Oui	Oui	Non	Limité	Non	Non	Non	Non	Non		
TAYLOR	Oui	Oui	Non	Limité	Oui	Oui	Non	Non	Non		
ARENA	Oui	Oui	Oui	Illimité	Oui	Oui	Oui	Option	Option		
SIPA	Non	Oui	Oui	Limité	Non	Non	Non	Oui	Oui		
SIM	Oui	Oui	Non	Limité	Non	Non	Non	Oui	Oui		
PROCESS											
MODLINE	Oui	Oui	Oui	Illimité	Oui	Oui	Non	Non	Non		
SIMPLE++	Oui	Oui	Non	Illimité	Oui	Oui	Non	Non	Non		
Ilog-Scheduler	Non	Non	Oui	Illimité	Oui	Oui	Non	Oui	Oui		

	DEVELOPPEMENT D'APPLICATIONS			ERGONOMIE			ANNEXES		
	Définition de bibliothèque s	Création d'interfac es	Programm es externes	Documentat ion	Prise en main	Visualisatio n Animation	Coût (KF)	Référenc es	Environneme nt
PROCESS	Non	Non	Non	-	Facile	Moyenne	8	-	Windows
TAYLOR	Oui	Non	Non	Moyenne	Facile	Excellente	75	700	Windows
ARENA	Oui	Oui	C++, F77	Volumineus e	Délicate	Bonne	100	8000	Windows
SIPA	Non	Non	Non	Volumineus e	Délicate	Médiocre	80	-	Windows
SIMPROCE SS	Oui	Non	C++	-	Moyenn e	Bonne	-	-	Windows
MODLINE	Oui	Non	QNAP	-	Délicate	Bonne	120	60	Unix
SIMPLE++	Oui	Non	Non	Complexe	Expert	Austère	65	-	Windows
Ilog- Scheduler	Non	Option	C++	Complexe	Expert	-	90	-	Windows NT

VI. DESCRIPTION DE L'ATELIER

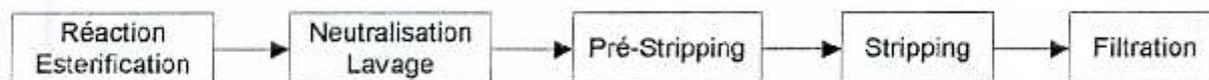
VI.1. Introduction

Les monomères acrylates et méthacrylates sont fabriqués sur deux lignes indépendantes L1 et L2.

Les produits sont commercialisés sous forme liquide (fût, container ou vrac) et destinés à des formulations durcissant sous l'effet de rayonnements (ultraviolets ou électrons) pour des applications telles que vernis, encres, adhésifs touchant des secteurs très variés allant de l'emballage à l'électronique en passant par l'impression ou la décoration. La figure VI.1 donne une aperçu des équipements de l'installation.

VI.2. LES ETAPES DU PROCEDE

Le procédé comprend 5 étapes principales telles que présentées sur le diagramme de la figure VI.1 et décrites ci-dessous (elles sont identiques sur les deux lignes L1 et L2) :



FigureVI.1. Etapes de fabrication dans l'atelier MFA

VI.2.1. Réaction

Etape de synthèse du monomère par estérification de l'acide acrylique et d'un polyol en milieu solvant (heptane ou heptane / toluène) entre 70 et 125 °C, en présence de catalyseur et de stabilisant. La réaction endothermique est contrôlée par chauffage à la vapeur. Un barbotage d'air appauvri (7 % O₂) est maintenu pendant toute la réaction.

Pour certaines qualités, l'estérification peut être menée sous vide (300 à 500 mbar).

VI.2.2. Neutralisation / lavages

Opération au cours de laquelle le brut d'estérification, additionné de solvant, est traité successivement avec une solution alcaline de soude (répétée si nécessaire), de l'eau et une solution saline (avec des étapes de décantation intermédiaires). Ces opérations permettent d'éliminer l'acide acrylique excédentaire, le catalyseur, les stabilisants et des impuretés qui ont pu se former pendant l'estérification.

VI.2.3. Pre-stripping

Agissant comme une étape tampon, cette phase permet de réguler le processus de fabrication. Elle sert aussi à décanter la phase organique de l'eau mais dans une très faible proportion.

VI.2.4. Stripping

Le produit du dernier lavage, après une dernière décantation dans le pré-strip, est traité sous vide (20 à 100 mbar) à chaud (60 à 120 °C) pour éliminer le solvant. Cette opération comme l'estérification, est effectuée en présence d'air appauvri. Le stripping pour certaines qualités peut se faire également en présence d'eau (steam stripping).

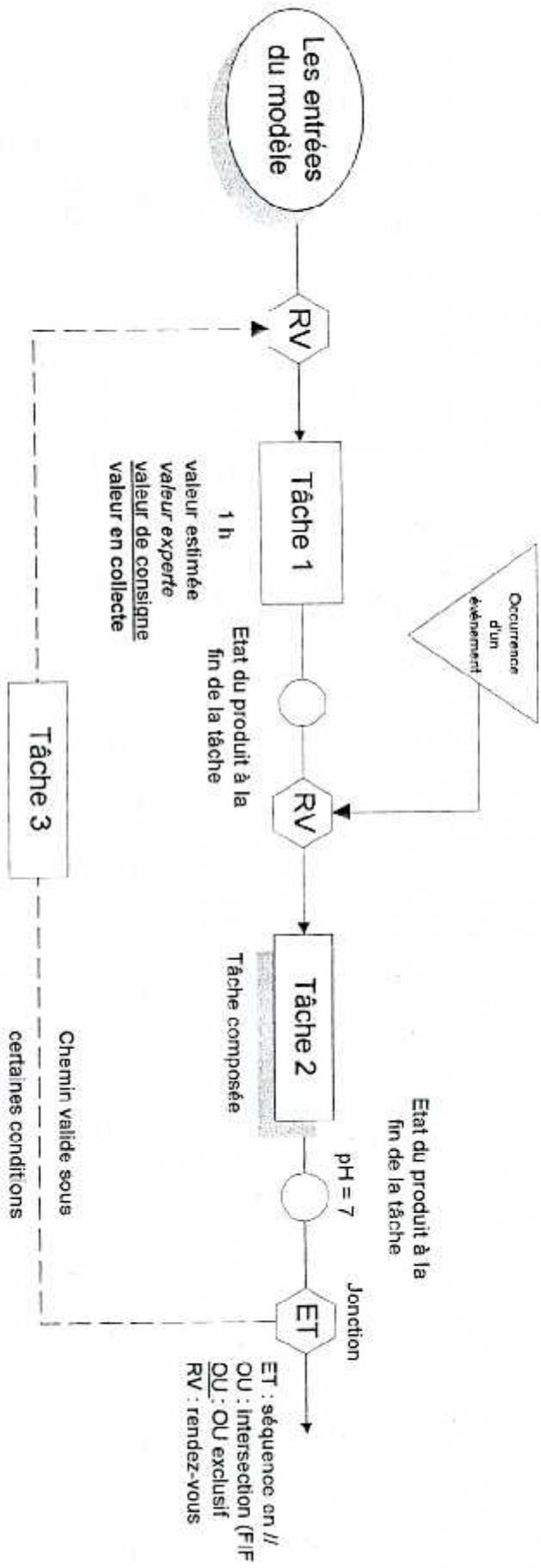
VI.2.5. Filtration

Le produit strippé est filtré à l'aide d'un adjuvant de filtration pour éliminer les impuretés solides. Le produit obtenu, totalement transparent, est ensuite soit enfûté (fût ou container) soit envoyé vers les stockeurs vrac de produits finis.

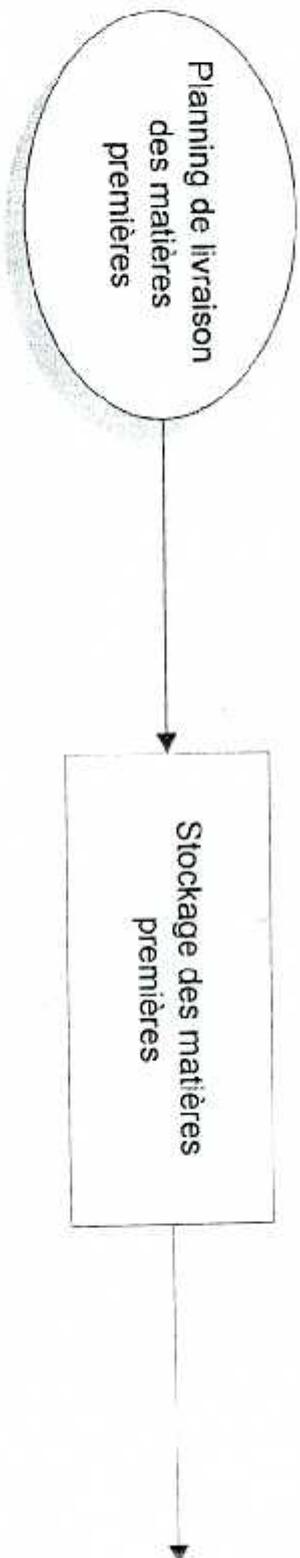
VII. LE MODELE LOGIQUE DE L'ATELIER

VII1. MODELE DU FLUX DE PRODUIT

LEGENDES DE L'ACTIGRAMME



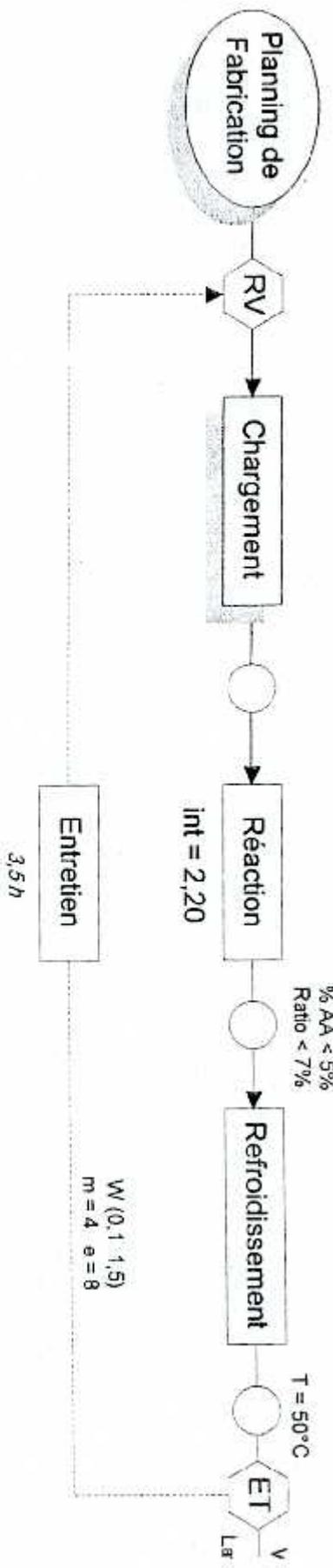
RECEPTION M.P. DANS LES STOCKEURS



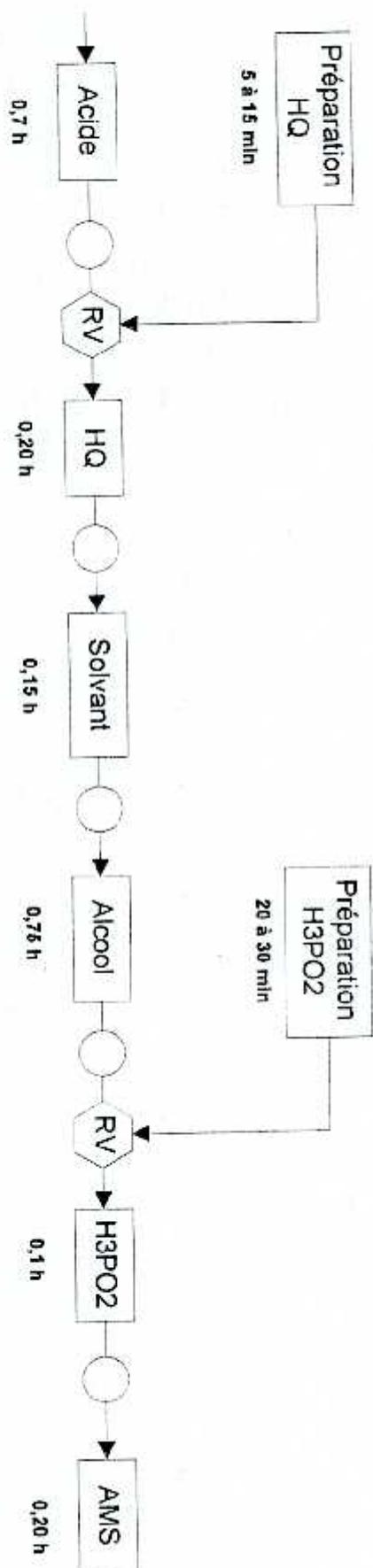
Remarque : Cette étape n'a de sens que dans le cas de stockage au niveau des stockeurs car elle monopolise des ressources propres à l'atelier MFA. Dans le cas de réception de fûts, la main d'œuvre (seule ressource nécessaire) est extérieure à l'atelier MFA, elle dépend du département logistique.

Produits concernés : AA, Heptane, Alcool, AMS, AMA, Soude, Toluène.

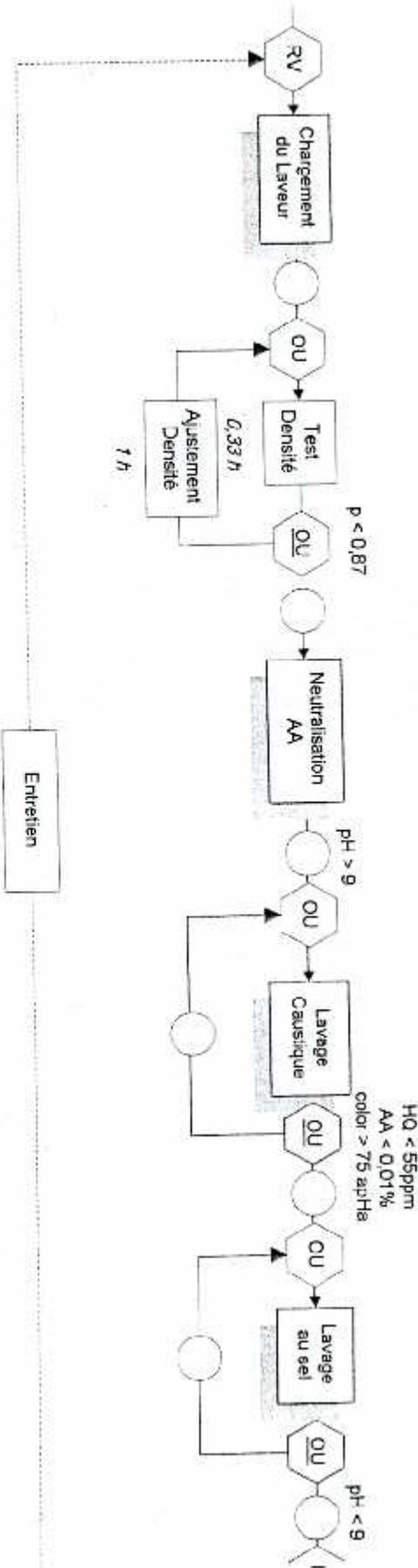
ESTERIFICATION



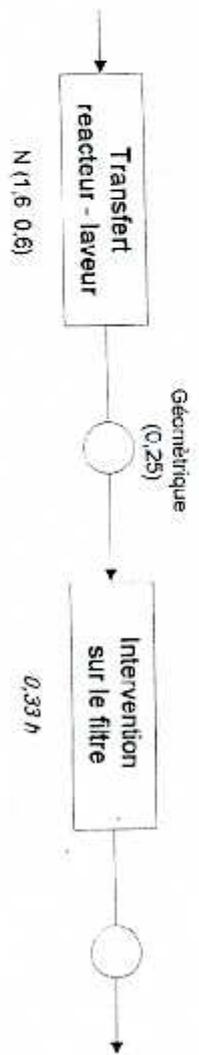
CHARGEMENT M.P.



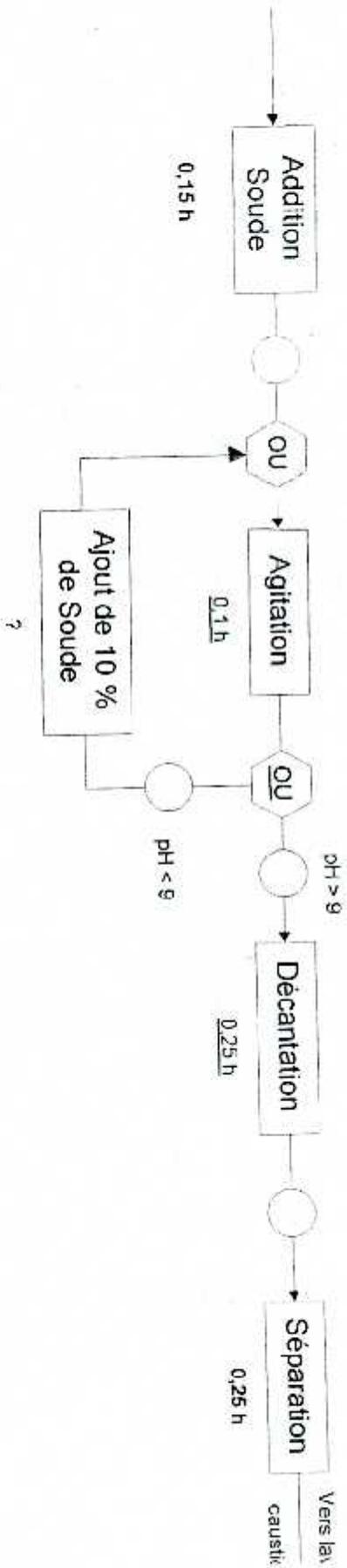
LAVAGE



CHARGEMENT DU LAVEUR



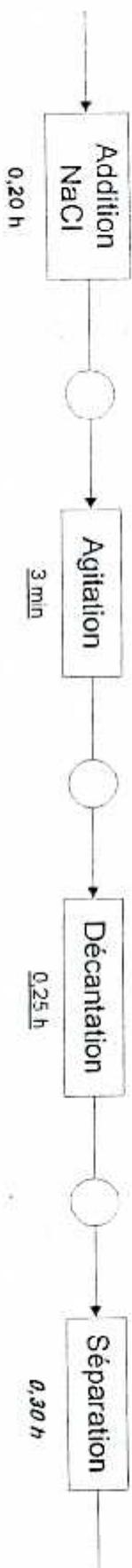
NEUTRALISATION DE AA



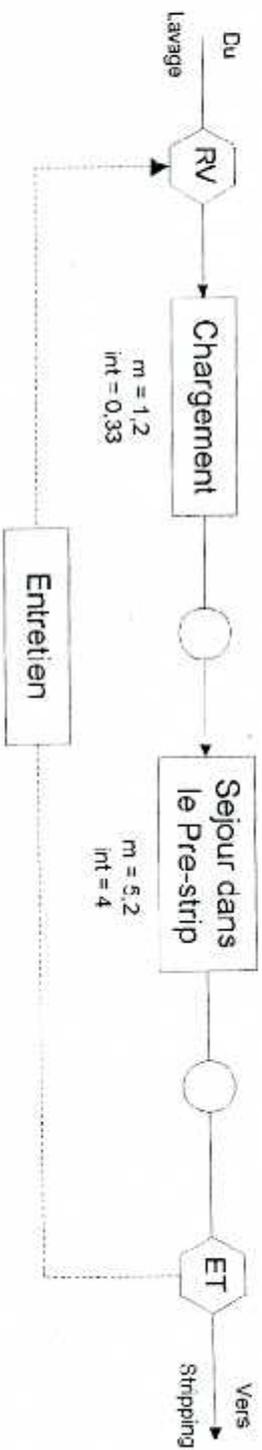
LAVAGE CAUSTIQUE



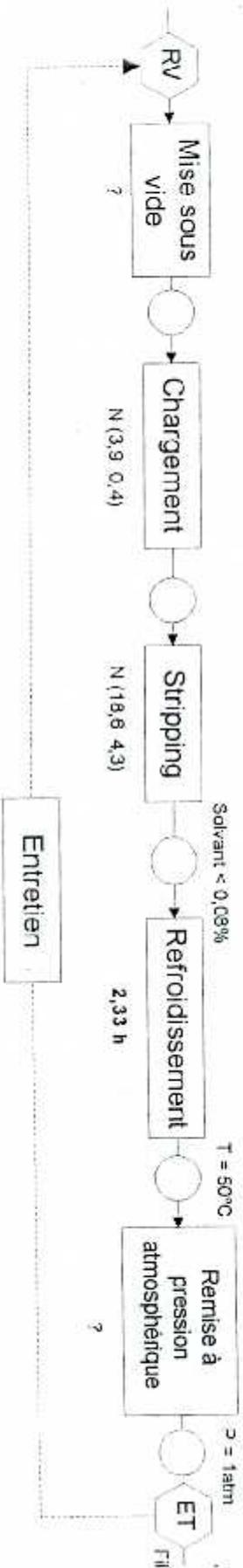
LAVAGE AU SEL



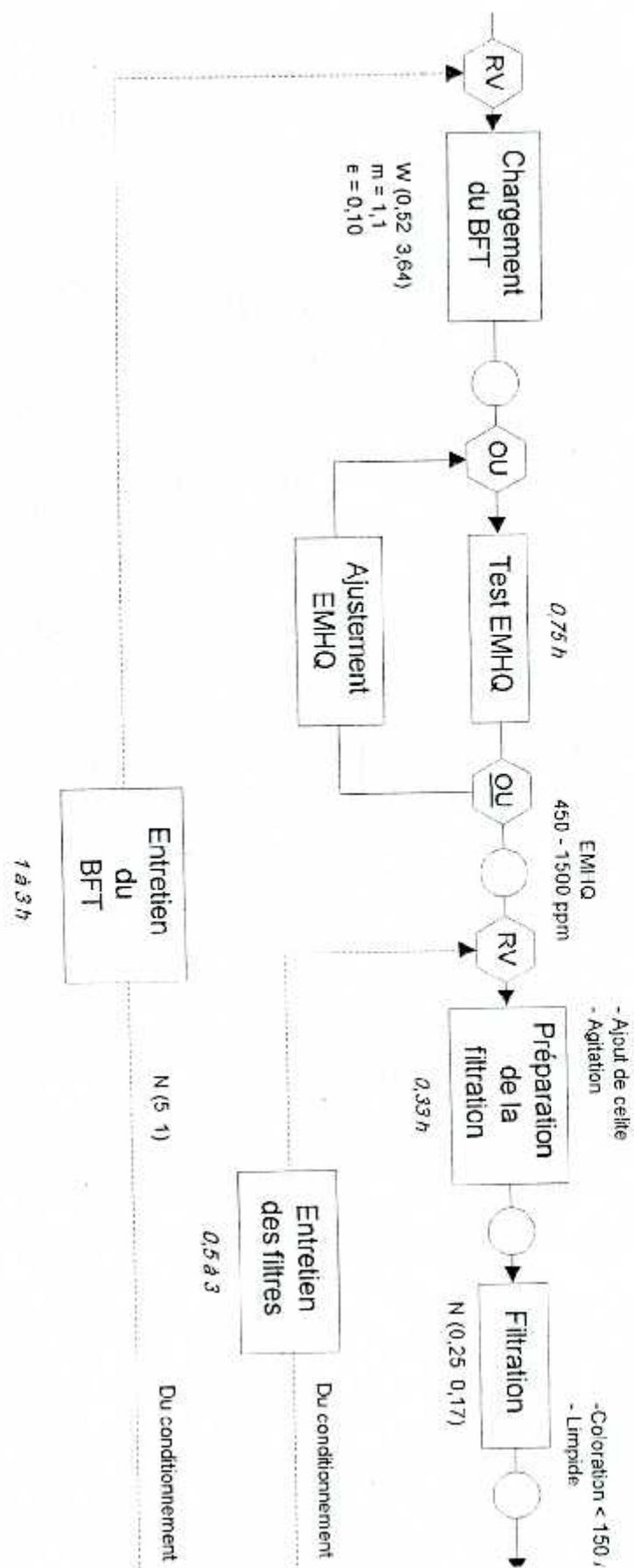
PRE-STRIPPING



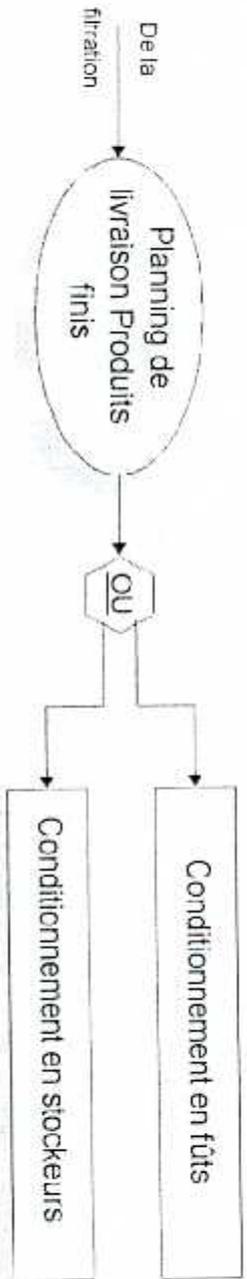
STRIPPING



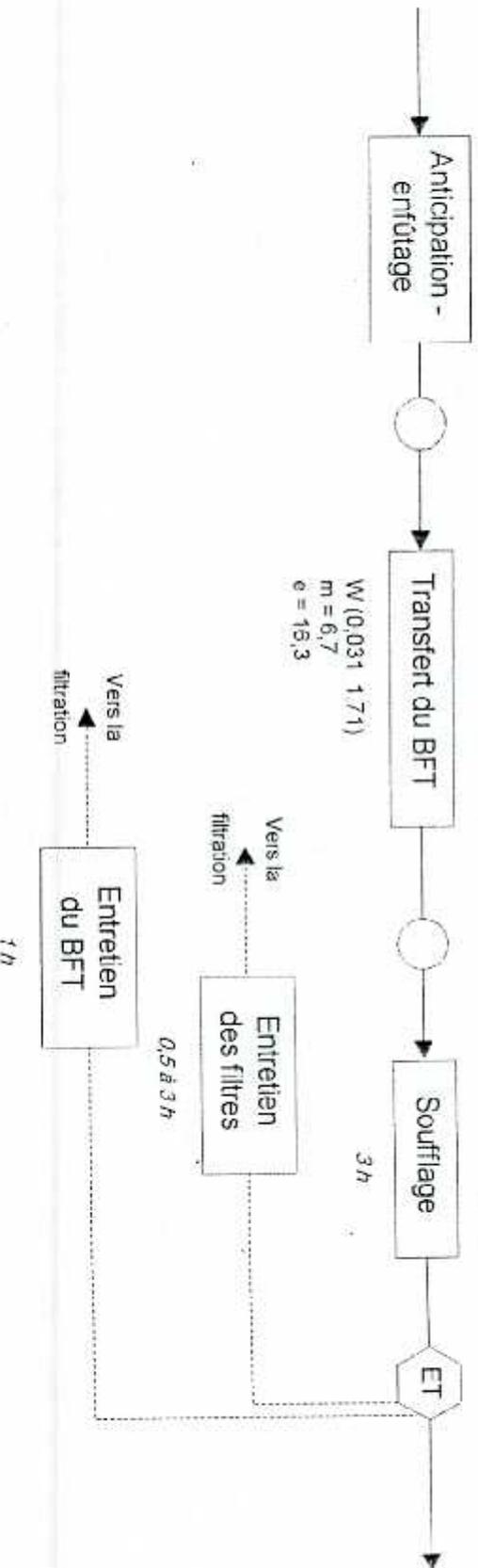
FILTRATION



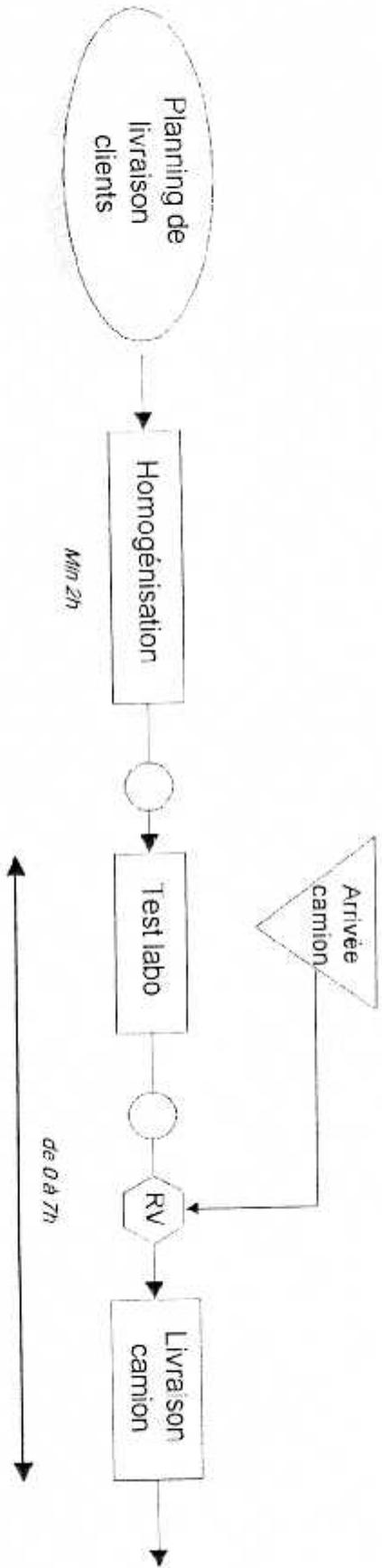
CONDITIONNEMENT PRODUITS FINIS



CONDITIONNEMENT EN STOCKEURS



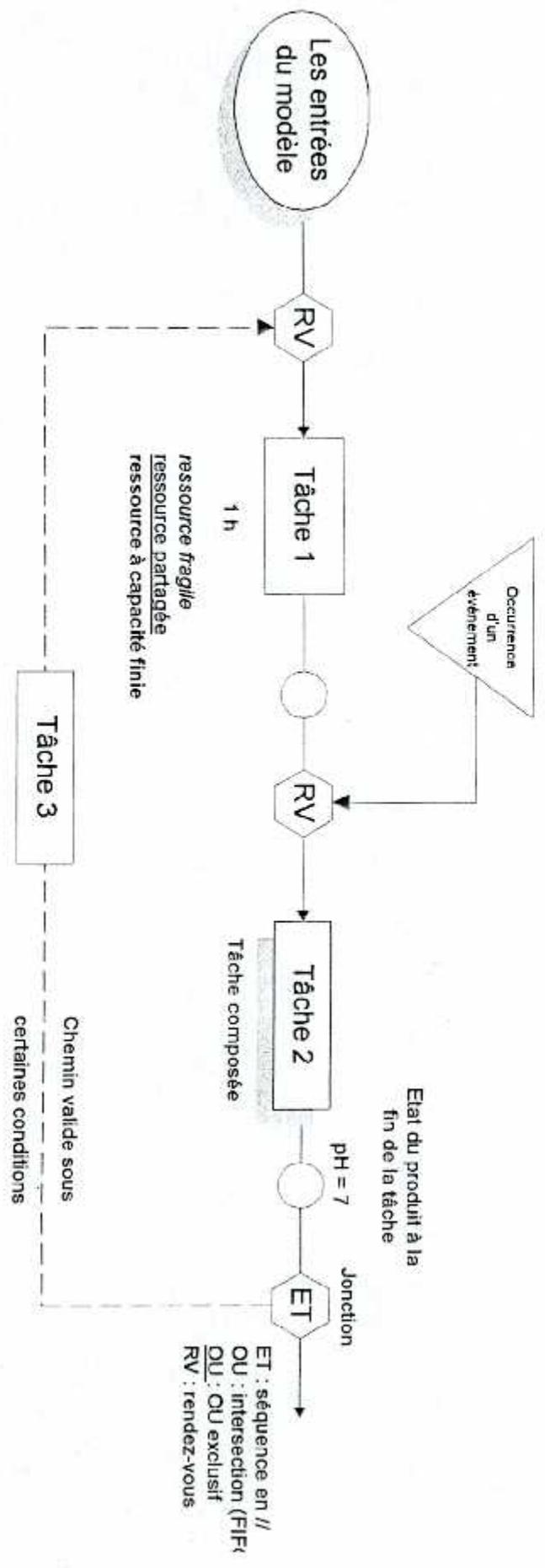
LIVRAISON DE PRODUITS FINIS A PARTIR DES STOCKEURS



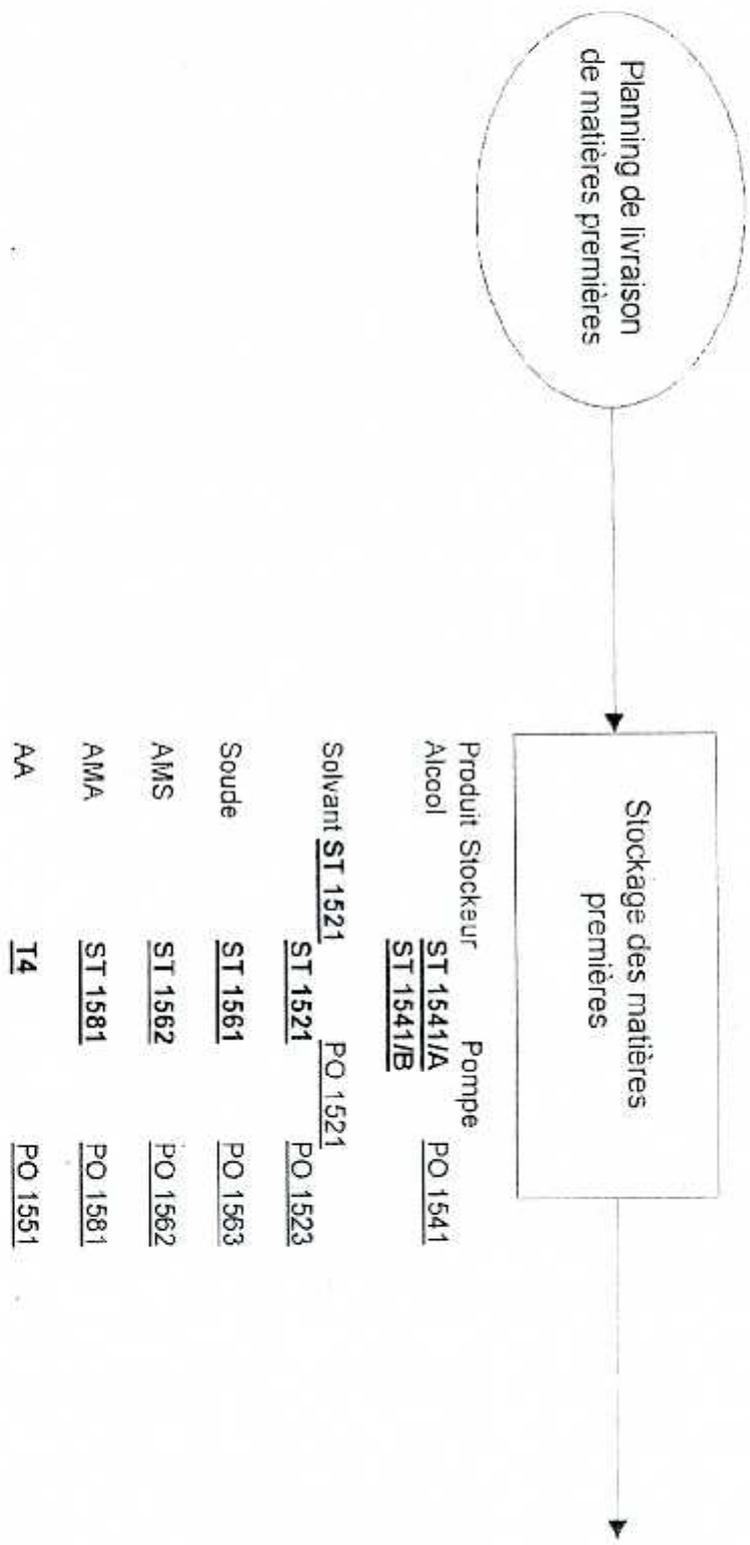
Remarque : Cette étape n'a de sens que dans le cas de destockage au niveau des stockeurs car elle monopolise des ressources propres à l'atelier MFA. Dans le cas de livraisons à partir de fûts, la main d'oeuvre (seule ressources nécessaires) est extérieur à l'atelier MFA, elle du département logistique.

VII.2. MODELE DES RESSOURCES

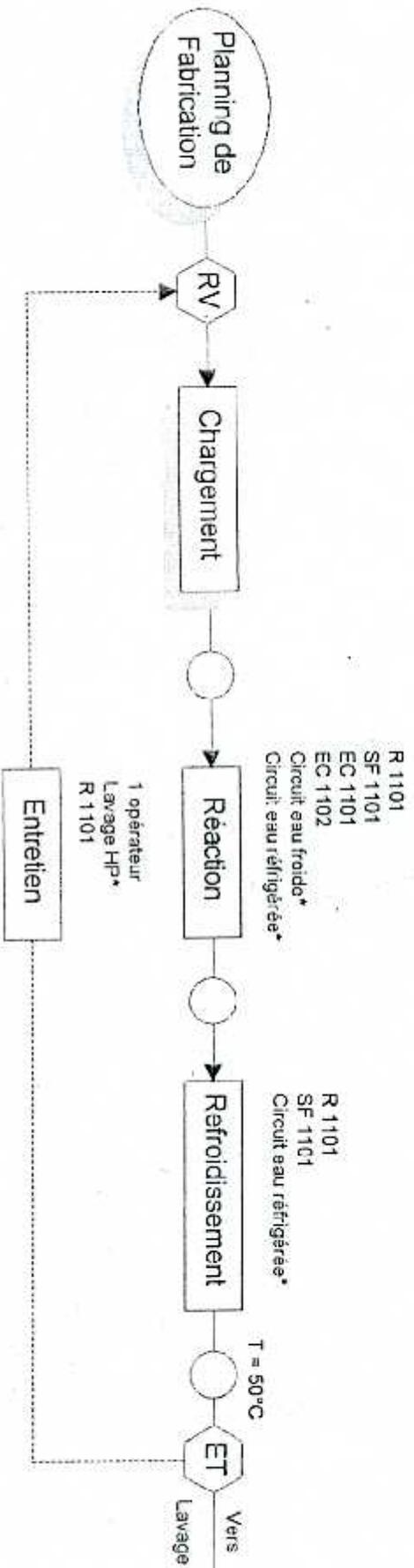
LEGENDES DE L'ACTIGRAMME



RECEPTION M.P. DANS LES STOCKEURS



ESTERIFICATION



Le lavage HP comprend : JA 1780

PO 1780
PO 1781
Caméra HP

Le circuit eau froide comprend : AE 1710*2

PO 1710 1701*2
BA 1710

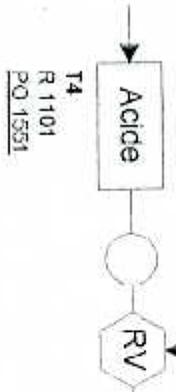
Le circuit eau réfrigérée comprend : AR 1701

PC

CHARGEMENT M.P.

1 opérateur
CO 1321
PO 1104
JA 1321

Préparation
HQ



T4
R 1101
PO 1551

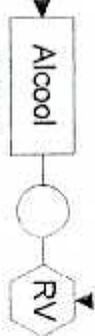
JA 1321
R 1101
PO 1104



ST 1521
R 1101
PO 1521

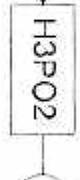
Préparation
H3PO2

1 opérateur
JA 1341
R 1101



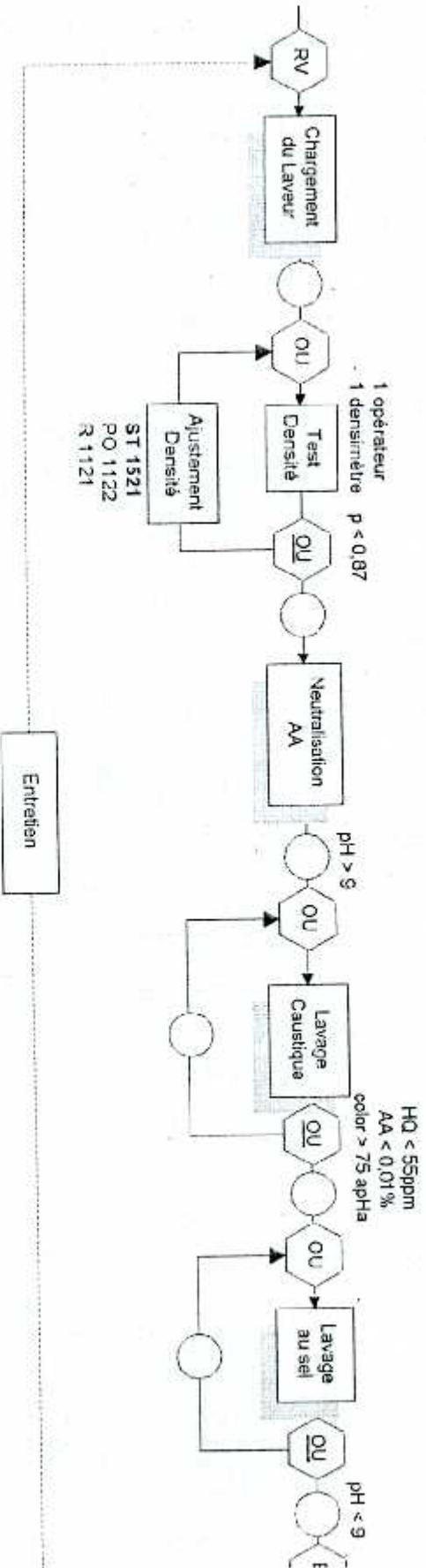
ST 1541
R 1101
PO 1541

R 1101
JA 1341

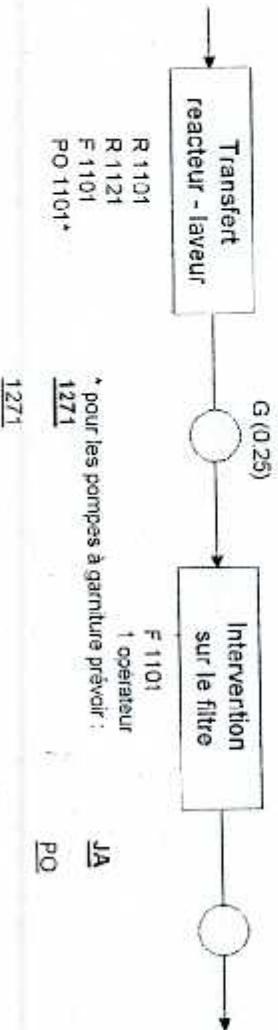


ST 1562
R 1101
PO 1562

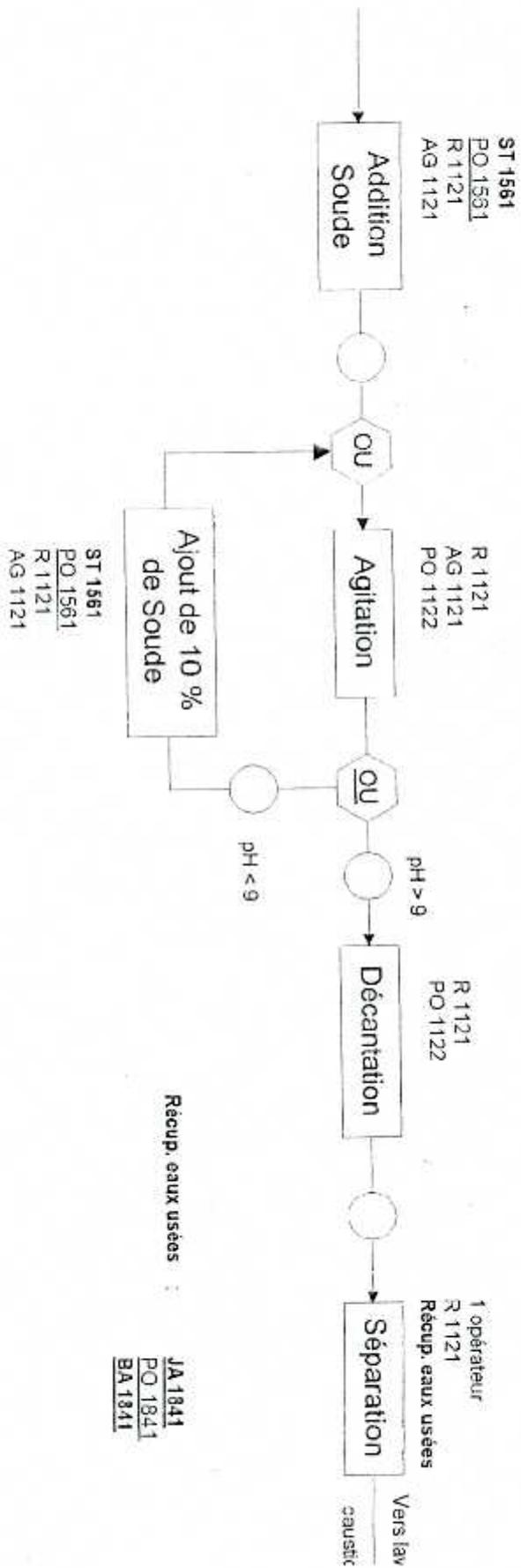
LAVAGE



CHARGEMENT DU LAVEUR



NEUTRALISATION DE AA



VIII SIMULATION DE L'ATELIER SOUS ARENA

VIII.1. IMPLEMENTATION

Le modèle de simulation a été développé sous Arena en décrivant l'évolution du batch dans l'atelier dans le même esprit que les actigrammes élaborés dans la première phase de ce travail. Le principe de base est de faire circuler des "entités" à travers un "bloc diagramme", les fonctionnalités étant attachés aux blocs uniquement. Il ya plusieurs types de blocs, certains recouvrants plusieurs fonctions différentes.

VIII.1.1. Modélisation du flux de produit

Les systèmes de flux de produit sont généralement modélisés dans Arena sous forme de processus. Dans un processus, on modélise un système particulier en étudiant les entités qui le traversent.

Notre modèle sera implémenté dans Arena sous la forme d'une représentation graphique de l'ensemble des processus rencontrés par le batch tout au long de son passage dans l'atelier. La description du fonctionnement de l'atelier s'est faite donc très naturellement en décrivant le déplacement du batch à travers les différents processus correspondant aux équipements, aux moyens de manutention, aux différents points de décision, etc. La modélisation du flux de produit dans Arena est basée sur trois concepts clés : le processus, l'action et l'entité.

Processus

Le terme "processus", tel qu'il est utilisé dans Arena, indique une séquence d'activités suivie par l'entité. Ainsi, dans le cas de l'atelier, un processus pourra être constitué d'une opération de lavage suivie d'une opération de prestripping. Ce mode de représentation est particulièrement utile dans le cas d'ateliers de production modulaires. L'ajout d'un processus peut se faire sans détruire l'architecture du modèle.

Un processus peut être décomposé en sous-processus pour réduire la complexité du processus initial, offrant ainsi une approche hiérarchique similaire à celle que nous avons adoptée dans le cadre de la modélisation de l'atelier. Pour construire le modèle de l'atelier avec Arena, nous avons d'abord défini des processus pour chaque opération de l'atelier (estérification, lavage, ...). Ces processus ont été ensuite connectés entre eux. Il a fallu ajouter entre autre un module "source" qui crée les lancements de batch et un module d'évacuation qui modélise la fin d'un traitement.

Pour modéliser un processus correspondant à une opération principale dans l'atelier (Estérification, Lavage, ...) nous avons choisi d'utiliser les modules "Action" d'Arena. Les actions qui composent un processus se suivent dans le temps pour décrire la dynamique de ce processus.

Action

Ce module recouvre une grande variété de fonctionnalités d'Arena. On peut regrouper dans une seule action plusieurs de ces fonctionnalités qui correspondent en fait aux traitements élémentaires qui s'opèrent dans un système de production. Parmi les fonctionnalités les plus utilisées :

Size : permet l'allocation de ressources à une action donnée

Delay : modélise la durée d'une action

Release : libère les ressources précédemment allouées

Tally : collecte des statistiques relatives à l'action...

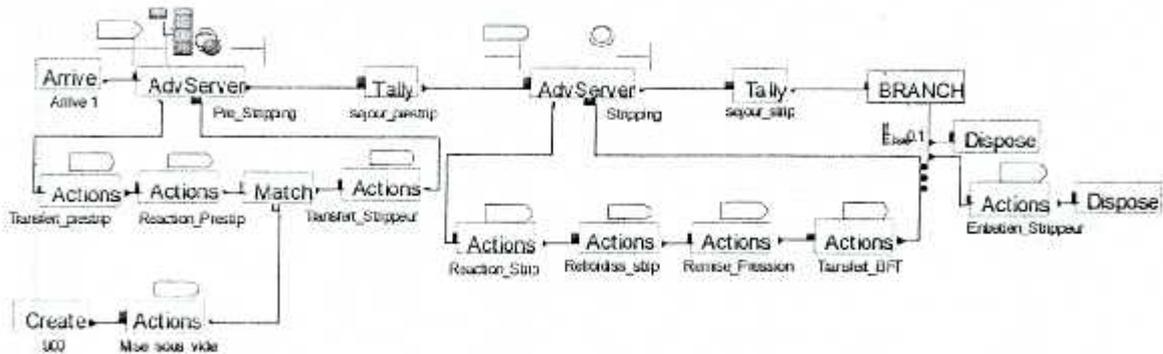


Figure VIII.1 : Implémentation sous Arena du préstripping et du stripping

A chaque fois qu'une entité traverse une action celle-ci est enclenchée. L'entité ne quittera ensuite l'action que si l'ensemble des fonctionnalités associées à l'action sont complètement réalisées.

La figure VIII.1 décrit la manière dont on combine les processus et les actions pour décrire le modèle du préstripping et du stripping. En dehors des processus et des actions on retrouve dans le flux des blocs (Match, Branch ...) qui correspondent en fait à des opérateurs de séquence (ET, OU, RDV...).

Entité

Le terme entité est un terme générique servant à désigner une personne, un objet ou une chose - réel(le) ou non - dont le mouvement à travers le système produit des changements dans l'état du système. A l'intérieur d'un système donné, il peut y avoir plusieurs types d'entités et chacune peut avoir des caractéristiques spécifiques et uniques appelées attributs. Dans le modèle de l'atelier, par exemple, une entité correspond à un batch dont les attributs sont le volume, la date, et la ligne qu'il suit

VIII.1.2. Modélisation des ressources

L'étape suivante a concerné la construction du modèle de ressources. Pour chaque équipement présent dans l'atelier nous avons généré un module "ressource" d'Arena. Ce dernier nous permet de déclarer dans ce module l'ensemble des informations liées à la ressource que nous avons utilisées dans la phase de modélisation : nom, capacité, pannes, disponibilité

On remarquera que pour le cas des stockeurs, nous distinguerons deux types de ressources. La première correspond à l'entité physique du stockeur et sert à modéliser la réservation du stockeur dans les opérations de stockage. La capacité de cette ressource étant égale à 1, elle sert à modéliser le fait qu'un stockeur ne peut être engagé que dans une seule opération à la fois. Le taux d'attente de cette ressource correspond aux attentes causées par des opérations de stockage en aval. La seconde ressource est une ressource à capacité variable qui sert à décrire l'évolution du volume de matières premières disponible dans le stockeur en fonction des différentes opérations de stockage. Le taux d'attente de cette ressource représentera les retards causés par l'indisponibilité de la matière première.

VIII.2. VALIDATION/VERIFICATION DU MODELE

Il est important, avant d'exploiter le simulateur obtenu à la fin du processus décrit dans le paragraphe précédent, de se demander si le simulateur obtenu représente correctement la réalité dans le contexte de l'atelier.

Les praticiens de la simulation ont quelque fois tendance à sous-estimer cette phase ce qui peut conduire à des échecs notables. Cette étape doit, en

fait, être présente à chaque étape du processus de modélisation et peut amener à tout instant, à remonter aux étapes précédentes.

On distingue deux principales étapes dans cette validation : la phase de vérification proprement dite où on s'assure que le modèle a bien été implémenté sur le simulateur choisi en l'occurrence Arena, et la phase de validation où on se préoccupe de la cohérence du modèle avec le problème posé.

VIII.2.1. VERIFICATION

La logique de fonctionnement du modèle implémenté dans l'étape précédente a été en partie vérifiée en suivant le cheminement de différentes entités à travers chaque sous-système (estérification, préstripping ...), puis à travers le modèle global de l'atelier. En faisant circuler les entités et en suivant leur cheminement on vérifie que les séquences d'événements sont bien conformes à celles prévues.

L'outil graphique d'Arena nous a apporté une aide efficace lors de cette phase de vérification. Il nous permet de suivre graphiquement le cheminement des entités sur l'écran en offrant la possibilité d'accroître ou de réduire la vitesse de l'animation graphique pour un suivi détaillé des différentes étapes de fabrication. Cette animation graphique permet ainsi de détecter instantanément les anomalies dans la dynamique de fonctionnement du système qui seraient très difficilement décelables sur un programme classique.

VIII.2.2. Validation

Si les outils informatiques apportent une aide de plus en plus efficace aux phases de vérification, il n'y a pas encore vraiment de technique spécifique

pour la validation, chaque simulation constitue pratiquement un nouveau cas particulier.

Il s'agit de vérifier dans cette étape si les hypothèses, suppositions et simplifications effectuées lors de la modélisation sont correctes et compatibles avec l'utilisation que l'on désire faire du modèle.

Dans le cas de l'atelier nous avons décidé de procéder selon une démarche visant à Vérifier si les résultats de simulation coïncident avec les mesures directement issues du site.

Pour récupérer les résultats de simulation nécessaires à cette étape, nous avons simulé l'atelier sur un horizon de temps voisin de 6 mois (28 semaines). Cet horizon de temps nous garantit une simulation d'au moins 100 batchs successifs, nombre qui nous semble nécessaire pour tenir compte des fluctuations possibles de l'atelier et de l'aspect aléatoire de certaines composantes du modèle.

Les résultats de la simulation ont été par la suite statistiquement analysés en utilisant l'"Output Analyser" d'Arena. Il s'agit là d'un post-processeur qui collecte automatiquement l'ensemble des variables statistiques déclarés par l'utilisateur puis les traite statistiquement en calculant la moyenne, la variance, la distribution et d'autre propriétés statistiques si on le désire. Dans le cas de l'atelier les variables auxquelles on s'est intéressé concernent essentiellement les temps d'occupation des différents appareils (réacteur, laveur, strippeur, ...), les temps d'attente pour le passage d'un appareil à l'autre ainsi que le taux d'occupation de chacun de ces appareils.

Pour mieux tenir compte de l'aspect aléatoire de certaines variables du modèle de l'atelier (durées des tâches ...) on a décidé de reproduire la simulation décrite plus haut un certain nombre de fois (précisément 100) afin

d'étudier la variabilité des résultats obtenus. Cette façon de faire nous permet de juger de la qualité des résultats obtenus lors d'une simulation. Plus cette variabilité est petite, plus le modèle est robuste.

VIII.2.3. Résultats et interprétations

Les résultats obtenus dans le cadre de la simulation de l'atelier sont regroupés dans le tableau VIII.1. En plus des résultats de la simulation, figurent dans ce tableau les valeurs issues de l'échantillonnage des données observées sur l'atelier afin d'en faciliter l'analyse.

	Réaction	Lavage	PréStrip	Stripping	Filtration	Stockage	
SIMULATION	Moyenne	31,30	8,00	11,14	29,50	10,30	5,30
	Ecart-type	0,5	0,07	0,21	0,80	0,27	0,3
	Δ (Ecart-type)	0,1	0,02	0,03	0,2	0,15	0,09
REALITE	Moyenne	34,90	14,29	9,68	30,16	10,57	6,51
	Ecart-type	5,33	4,62	6,76	8,22	6,69	4,25

Tableau VIII.1 : Résultats de la simulation du modèle initial.

A chaque variable mesurée nous associons une moyenne et un écart-type ainsi qu'une variation sur l'écart-type dans le cas des valeurs issues des résultats de la simulation. Cette variation est le résultat des nombreuses simulations que nous avons effectuées, comme on l'a expliqué dans le paragraphe précédent.

En analysant les chiffres figurant sur ce tableau on arrive vite aux conclusions suivantes :

En terme de moyenne, le modèle simulé reproduit fidèlement l'atelier même si les résultats issus de la simulation sont légèrement en dessous des valeurs réelles. Cet écart signifie d'ailleurs que le modèle est moins contraint que l'atelier qu'il modélise. Ce qui est tout à fait correct car nous avons volontairement omis certains aspects de la production lors de la construction de ce modèle (pannes sur l'équipement, présence de la deuxième ligne ...).

En terme de variation, les résultats fournis par le modèle sont très moyens. L'écart des valeurs obtenu lors de la simulation est très faible par rapport l'écart réellement observé sur l'atelier, cela signifie par ailleurs que le modèle est moins perturbé que l'atelier. Les raisons de cet écart, qui était prévisible, sont que le modèle élaboré dans la première phase de cette étude ne tient pas compte de certaines données liées aux différentes perturbations se produisant sur le site. Ces données concernent essentiellement :

- les pannes : elles constituent une des sources principales qui font que les durées opératoires sont en réalité plus grandes que celles obtenues par simulation.
- la gestion des stock : le manque de matière première est une autre raison qui explique le retard que peuvent subir certaines opérations. A cause de la limitation de la capacité des stockeurs et l'indisponibilité de se faire livrer de la matière première à toute heure (uniquement pendant les heures de manutention) les stockeurs se trouvent vides ou pas assez pleins pour lancer certaines opérations de chargement. Le fait d'avoir limité notre modèle uniquement à la première ligne alors qu'en réalité les stockeurs alimentent les deux lignes à la fois a fait que nous étions moins souvent en rupture de stock dans le modèle que dans la réalité. Toujours par rapport au stockeurs, il faut rappeler que sur le site la livraison de matières premières par les fournisseurs accuse parfois des retards que nous n'avons pas pu inclure dans le modèle parce que les données à ce sujet sont indisponibles.

VIII.3. AMELIORATIONS

Afin d'accroître la fidélité du modèle et remédier aux lacunes citées précédemment, nous avons décidé de réfléchir à un modèle de pannes qui permettrait de corriger l'écart du modèle initial. Etant dans l'impossibilité d'avoir des données précises sur les différentes pannes ayant lieu sur le site, on a décidé de construire un modèle de pannes "qualitatif" qui repose plutôt sur l'expérience et sur la mémoire des différents opérateurs intervenant sur le site. On a ainsi demandé à chacun de ces opérateurs de décrire l'ensemble des pannes auquel il a l'habitude d'être confronté en précisant leur nature et leur impact, ainsi qu'une évaluation approximative de leur durée et de leur fréquence.

L'implémentation de ce modèle s'est faite sans trop de problèmes. Arena permet en fait d'associer à chaque processeur (un processeur correspond à une opération principale) un ensemble de pannes différentes et préciser pour chacune de ces pannes des données sur la durée, la fréquence l'impact etc.

Les résultats issues de la simulation de ce nouveau modèle de l'atelier (intégrant les pannes) sont regroupées dans le tableau VIII.2.

	Reaction	Lavage	PreStrip	Stripping	Filtration	Stockage
SIMULATION	Moyenne	32.25	8.69	11.14	29.50	10.30
	Ecart-type	2.30	0.80	1.50	0.80	1.78
	Δ (Ecart-type)	0.15	0.02	0.25	0.04	0.1
REALITE	Moyenne	34.90	14.29	9.68	30.16	10.57
	Ecart-type	5.33	4.62	6.76	8.22	6.69

Tableau VIII.2 : Résultats de simulation du modèle amélioré (avec pannes)

Les résultats de ce nouveau modèle sont nettement meilleurs que ceux obtenus dans le cadre du premier modèle. Ils montrent en effet un accroissement de l'écart du modèle qui se rapproche de l'écart réel observé sur l'atelier mais aussi une légère amélioration de la moyenne.

VIII.4. EXPLOITATION DU MODELE

Nous avons achevé dans le paragraphe précédent la validation du modèle de l'atelier et les résultats de ce modèle se sont avérés satisfaisants. On peut alors envisager l'utilisation de ce modèle pour tester divers scénarios et prédire le comportement de l'atelier dans des configurations différentes de la configuration actuelle de l'atelier : n'est ce pas la le rôle de la simulation?

Dans cette optique nous avons élaboré des scénarios mettant en jeu diverses hypothèses concernant aussi bien les ressources matérielles, les opérateurs ou encore des hypothèses relatives à la gestion de l'atelier. Nous allons décrire dans la suite du document la simulation de ces divers scénarios.

VIII.4.1. Scénario I : production sur 7 jours

Scénarios I : Quel serait l'impact d'une activité de production tout le long de la semaine?

On se propose de vérifier dans ce scénarios l'effet que pourrait avoir l'extension de la période d'activité de l'atelier de 6 à 7 jours (toute la semaine) sur le volume de la production, c'est à dire sans interruption durant le week-end tel que c'est la cas actuellement.

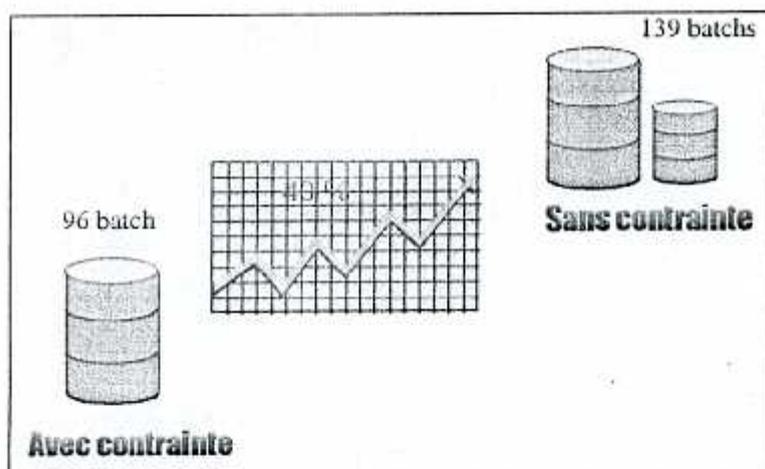


Figure VIII.2 : Evolution de la production sans la contrainte du week-end

Comme le montre la figure VIII.2, la productivité de l'atelier fonctionnant en plein régime tout le long de la semaine effectue un bond de 40%. Cette augmentation importante du volume de production s'explique par le fait que l'interruption du week-end impose une contrainte drastique dans le déroulement des campagnes de production actuelles. En effet, bien au delà des 24 heures d'inactivité qu'impose le repos du week-end, le fait de ne pas pouvoir lancer de batch à moins qu'on soit sûr de le finir avant la fin de la semaine (en moyenne 30 heures avant la fin de la semaine) impose souvent une inactivité moyenne de l'estérification de l'ordre de 54 heures. On peut aisément expliquer dans ce cas le gain de production si cette contrainte venait à disparaître. Il faut néanmoins s'attendre à ce que le gain réel soit un peu inférieur au gain prédit par la simulation car il faut tenir compte à la fois de la présence de la deuxième ligne mais aussi du fait qu'il est impossible de se faire livrer de la matière première pendant tout le week-end. Une parade à cette dernière contrainte serait alors d'augmenter la taille des stockeurs.

VIII.4.2. Scénario II : un réacteur supplémentaire

Ce scénario est le type de question que se posait le responsable de production dans le choix de ses investissements futurs dans l'atelier. Il serait

utile de pouvoir prédire l'impact d'une telle décision avant toute réalisation, vu le coût de ce genre de projet.

Nous avons modifié alors le modèle initial en lui ajoutant un deuxième réacteur (identique au premier). Ce deuxième réacteur est ensuite connecté au laveur de la ligne 1. On obtient ainsi une configuration avec deux réacteurs identiques fonctionnant en parallèle et alimentant la même ligne en aval (laveur, préstrip...).

La figure VIII.3 résume les résultats de la simulation de ce deuxième scénario. Au delà de l'augmentation de la productivité, conséquence directe du rajout du deuxième réacteur, nous observons la formation de goulots d'étranglement sur l'ensemble des équipements situés en aval des réacteurs, exception faite de la filtration. Ces goulots d'étranglements sont liés au temps d'attente importants que subissent les différents batchs pour accéder aux différents appareils cités dans la figure VIII.3. Le fait que la filtration en soit épargnée indique que c'est le strippeur qui est à l'origine de ces goulots. Cette conséquence était prévisible vu la durée importante du stripping par rapport au lavage et au préstripping. En fait les goulots qui apparaissent respectivement au niveau du laveur puis au niveau du préstrip ne sont pas propres à ces équipements mais découlent du goulot principal du au stripping.

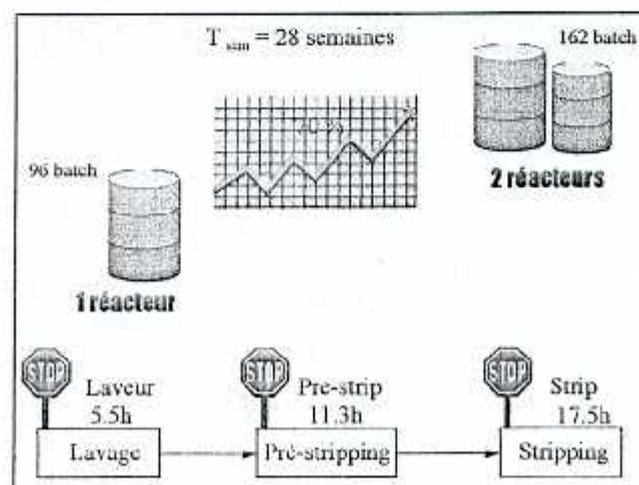


Figure VIII.3 : Effet sur la production d'un réacteur supplémentaire

Le fait de faire démarrer les deux réacteurs avec un décalage dans le temps égale à la durée de lavage (10 h) n'arrange pas la situation. Il devient alors impératif de procéder à une optimisation de ce temps de décalage afin de réduire ces temps d'attente.

	Laveur	Préstrip	Strippeur
Avec contrainte	5.5	11.3	17.5
Sans contrainte	3.7	6.02	13.7

Tableau VIII.3 : temps d'attente devant les différents équipement (en heures) en tenant compte ou pas de la contrainte du préstrip

L'autre éventualité que nous avons testé consiste à éliminer la contrainte du séjour minimal de 4 heures dans le préstrip. Si cette contrainte n'a plus lieu, c'est à dire si le produit peut quitter le préstrip à chaque fois que le strippeur est libre, on note une diminution sensible des temps d'attente (tableau VIII.3). On peut espérer de meilleurs résultats si on combine cette nouvelle règle de conduite de l'atelier avec une optimisation du décalage dans le lancement des deux réacteurs. un opérateur de plus

VIII.4.3. Scénarios III : Quel serait l'effet d'un opérateur supplémentaire ?

En ajoutant un opérateur dans le modèle de l'atelier les résultats issus de la simulation ne varie presque pas. Peut-on dire alors que le fait de rajouter un

troisième opérateur n'a pas de conséquence directe sur la productivité ? Logiquement, la réponse serait oui, mais la réponse doit être plus nuancée. En effet le modèle initial avec deux opérateurs ne tient pas compte de l'intervention de ces opérateurs dans le bâtiment voisin de l'atelier ni de leur déplacement dans l'enceinte même de l'atelier. La modélisation de la composante humaine dans l'atelier est très relaxée par rapport à la réalité des choses et ne permet donc pas d'évaluer les résultats issus de la simulation de ce scénarios. Les choses auraient été différentes si nous avions constaté une augmentation de la productivité. Dans ce cas on aurait pu conclure que l'ajout d'un opérateur augmente la production, car si la production du système relaxé (le modèle) augmente, alors la production du système réel (l'atelier) ne peut qu'augmenter. Par contre dans le cas contraire (pas d'augmentation) on ne peut malheureusement rien conclure.

Il faut ajouter à cela que même si on peut imaginer l'effet que peut avoir un nouvel opérateur dans l'atelier, on peut difficilement chiffrer cet impact en terme de productivité car le gain d'un batch suppose que l'on gagne 30 h par rapport à un fonctionnement avec deux opérateurs ce qui est loin d'être le cas vu que l'intervention des opérateurs se limite à des tâches ponctuelles. Il faut alors d'autres critères d'évaluation.

CONCLUSIONS

A nos yeux, le principal objectif de l'étude a été atteint, à savoir une maîtrise relative de la méthodologie globale à suivre pour mener à bien l'opération de modélisation et de simulation d'un procédé chimique discontinu avec toutes les ambiguïtés, les spécificités et les originalités que peut comporter un tel procédé.

Quant aux conclusions qu'on peut tirer sur l'étude de l'atelier lui-même, nous les résumons en deux chapitres :

Sur les résultats de l'étude

Les résultats issus des différentes simulations ont permis de confirmer un nombre d'observations déjà remarquées :

- En particulier en ce qui concerne le goulot d'étranglement de l'atelier ; l'estérificateur est le point sur lequel repose l'ensemble de la production. Cette a par ailleurs démontré que le stippeur est un centre de charge très sensible et pourrait devenir à son tour un goulot d'étranglement si on rajoutait un deuxième réacteur par exemple.
- Les stockeurs constituent à l'heure actuelle une des raisons majeures des retards dans la production. Le redimensionnement de ces stockeurs améliorerait la production et réduirait les contraintes sur la gestion de production.

- La contrainte relative à l'arrêt de la production pendant le week-end pèse lourdement sur la gestion de production puisque elle rend les planifications au delà de la semaine très délicates.

Sur le logiciel de simulation utilisé

ARENA a permis, grâce à ses nombreuses fonctionnalités, une représentation assez souple de l'atelier et de son pilotage. Aucun problème majeur dans la représentation n'a été soulevé à ce niveau.

Au travers de cette étude, on a montré le rôle que pouvait avoir la simulation discrète événementielle dans l'évaluation et l'analyse d'un atelier batch.

L'hypothèse qui consiste à considérer que l'atelier est équivalent à un système de production discret, avec des temps opératoires estimés sur l'historique de l'atelier, s'est avérée correcte puisque le modèle construit sur la base de cette considération a fourni des résultats encourageants. On peut alors envisager raisonnablement l'application de cette technique à l'ensemble des ateliers batch à condition de pouvoir estimer à priori, comme nous l'avons fait dans notre cas, les durées opératoires.

L'utilisation du modèle et de sa simulation pour l'analyse et le test de scénarios de production s'est avérée tout à fait concluante.

Ce type de démarche constitue en fait un outil rigoureux qui dans le cas d'atelier flexible permet à répondre à des interrogations aussi diverses et variées, allant du dimensionnement d'équipements à l'ordonnancement des ordres de fabrication, en passant par le problème de recherche de goulots d'étranglement ou celui de l'amélioration de la fiabilité des équipements.

Enfin, nous préconisons vivement pour la suite de ce travail :

- La nécessité d'établir un modèle fiable et complet des pannes pour accroître la fidélité du modèle proposé. Cette contrainte impose donc un

suivi quotidien des différents équipements pour l'archivage de l'ensemble des pannes qui ont lieu dans l'atelier.

- Procéder à une modélisation fine de la deuxième ligne de l'atelier, afin de mieux tenir compte de l'évolution des stocks et de la disponibilité des opérateurs humains, deux ressources qui, rappelons le, sont commune aux deux lignes de production.

REFERENCES

1- Daubas, B. (1995)

Modélisation et simulation des procédés continus et discontinus

Thèse doctorat, INP TOULOUSE

2- Bel, G. (1983).

Méthodes et langages de simulation pour la production automatisée : principes, choix, utilisation.

Actes du Congrès AFCET Automatique, pp. 41-52

3- Hamaidi, L. (1993).

Some things about modelling and simulation

ENSCParis, unité de recherche modélisation

4- Braesch C. & Haurat A. (1995)

La modélisation systémique en entreprise.

Editions Hermes, Paris.

5- Vernadat, F. (1993)

CIMOSA: Entreprise modelling and entreprise integration using a proces-based approach, In *Information Infrastructure Systems for Manufacturing.*

North Holland, Amsterdam.

6- Saporta, G.(1990)

Probabilités analyses des données et statistiques.

Editions Technip, Paris.

7- Lawrence, L. (1990)

Probability and statistics for modern engineering.

Second Edition, Duxbury Press, Belmont.

8- Cernault, A. (1988)

La Simulation des Systèmes de Production.

Edition Cepadues, Toulouse.

9- Delanay, W., and E. Vaccari (1989)

Dynamic Models and Discrete Event Simulation

Marcell Dekker Editions.

10- Rosenof, H. P. Ghosh, A. (1987)

Batch process automation. Theory & practice.

Van Nostrand Reinhold Compagny, New York.

11- Cuille , P. (1986) .

Approche de la simulation dynamique application, application aux procédés discontinus

Thèse doctorat, INP TOULOUSE.

12- Gani R, Hytoft G, Jaksland C and Jensen A.K (1997)

An integrated computer aided system for integrated design of chemical processes.

Computers chemical engineering Vol 21 pp 1135-1146

13- Laganier F (1996)

Dynamic process simulation : Trends and perspectives in an industrial context

Computers chem engng Vol 20 pp 1595-1600.

14- Orçun. S, Kuban. I and Hortaçsu. O (1996)

Scheduling of batch processes with operational uncertainties

Computers chem engng Vol 20 pp 1191-1196

15- Poulain. C.A and Finlayson.B.A (1996)

Distributed computing with personal computers

AICHE J January Vol 42 n° 1

16- Ravemark.D.E and Rippin .D.W.T (1996)

Optimal design of multi-product batch plant

Computers chem engng Vol 20 pp 1215-1221

17- Rittershaus .E, Weinhold.F and Tonshoff.H.K (1995)

Process-related simulation applied to manufacturing optimisation

Computer integrated manufacturing Vol 8 pp 79-91

18- Santen.A, Koot.G.L.M and Zullo.L.C (1997)

Statistical data analysis of a chemical plant

Computers chem engng Vol 21 pp 1123-1129

19- Simensen.J and Foss.B.A (1996)

A concept for modelling batch plant operation

Computers chem engng Vol 20 pp 1245-1250

18- Subrahmanyam.S, Kudva.G.K Basset.M.H and Pekny.J.F (1996)

Application of distributed computing to batch plant design and scheduling

AICHE J June Vol 42 n°6

19- Xi-Gang.Y, Zhong-Zhou.C (1997)

A hybrid global optimization method for design of batch chemical processes

Computers chem engng Vol 21 pp 685-690

20- Zeigler.(1986)

Theory of modelling and simulation

Editions John WILEY, NY

ANNEXE 1

RAPPELS STATISTIQUES

La loi de Weibull

Sous sa forme la plus générale, très utilisée en fiabilité des matériels, X suit une loi de Weibull à trois paramètres a , b , γ si :

$\frac{X^\beta - \gamma}{a}$ suit une loi exponentielle (X est la durée de vie).

Le paramètre b est le paramètre de "forme".

Avec $\gamma = 0$ et $\gamma = 0$, la densité de X est (pour x positif) :

$$f(x) = \beta x^{\beta-1} \exp(-x^\beta)$$

La figure VII.1 représente une loi de Weibull pour $\beta = 2$.

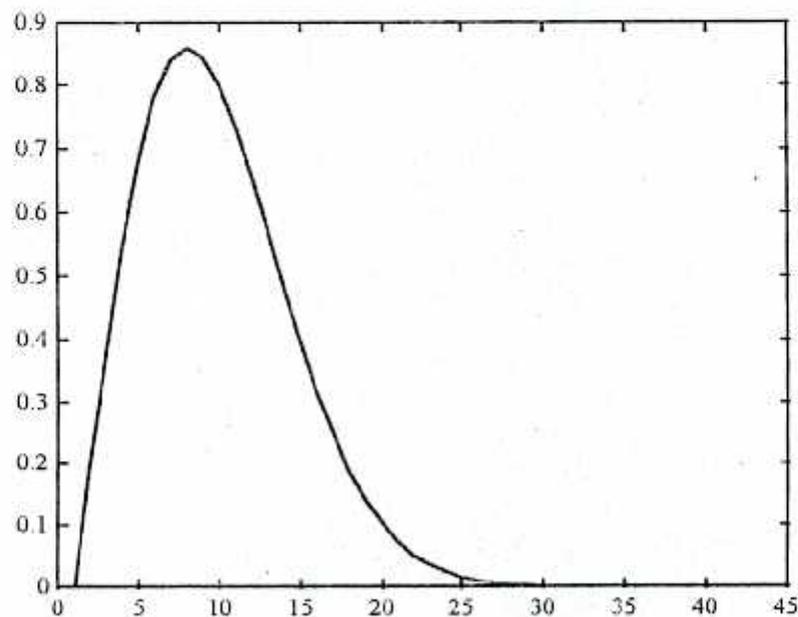


Figure 1 : Fonction de densité de la loi de Weibull

Dans le cas de la loi de Weibull, on s'intéresse souvent au taux instantané de défaillance défini comme :

$$\frac{P(x < X < x + dx / X > x)}{dx} = \frac{f(x)}{1 - F(x)}$$

et qui vaut donc $\beta x^{\beta-1}$.

$b > 1$ correspond à un matériel qui se dégrade avec le temps (usure)

$b < 1$ à un matériel qui se bonifie avec le temps

$b = 1$ (loi exponentielle) à un matériel sans usure (pannes purement accidentelles).

La loi normale (ou loi de Laplace-Gauss)

Cette loi joue un rôle fondamental en probabilités et en statistiques : elle constitue un modèle fréquemment utilisé dans différents domaines.

Malgré son appellation malencontreuse de loi normale, elle est cependant loin de décrire tous les phénomènes physiques et il faut se garder de considérer comme anormale une variable qui ne suit pas la loi de Laplace-Gauss.

X suit une loi normale si sa densité est :

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{x-m}{\sigma}\right)^2\right)$$

avec m la moyenne et σ l'écart-type.

La fonction de répartition et la densité de X sont représentées dans la figure VII.2 pour $m = 0$ et $\sigma = 1$.

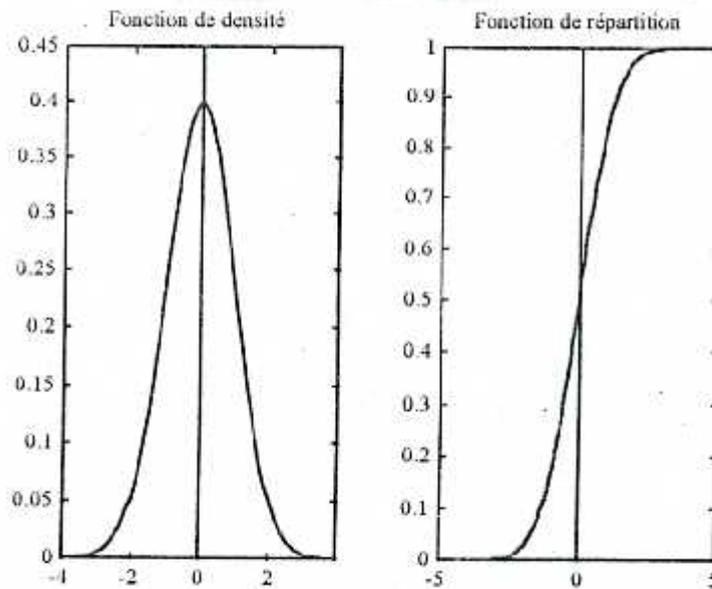


Figure 2 : Fonctions de densité et de répartition de la loi Normale

La loi Géométrique

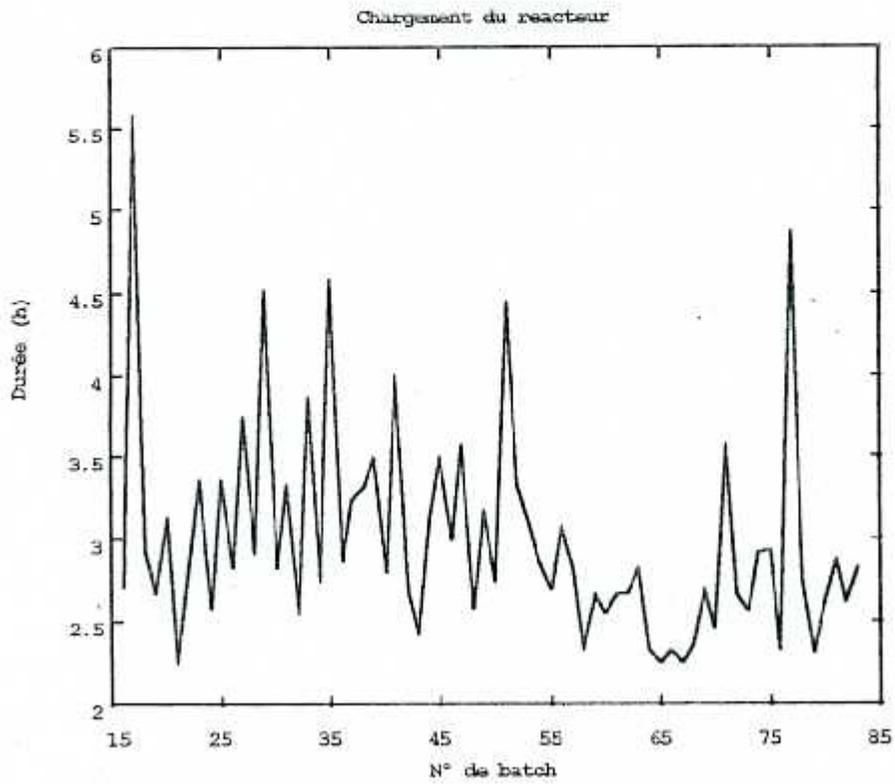
La loi géométrique, $G(p)$, est la loi du nombre d'essais nécessaires pour faire apparaître un événement de probabilité p .

$$P(X = x) = p(1 - p)^{x-1} \quad x = 1, 2, \dots, \infty$$

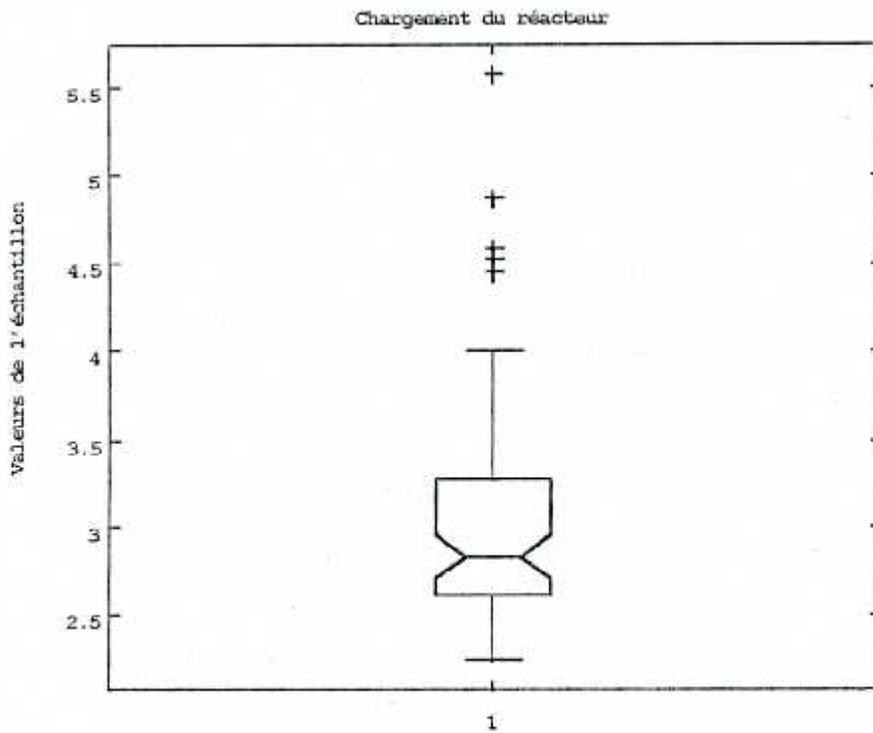
La probabilité p est calculée à partir des données disponibles sur l'événement étudié. Si on considère l'exemple de l'entretien du réacteur de l'atelier, cette probabilité est égale à 0.25 (1 fois sur quatre).

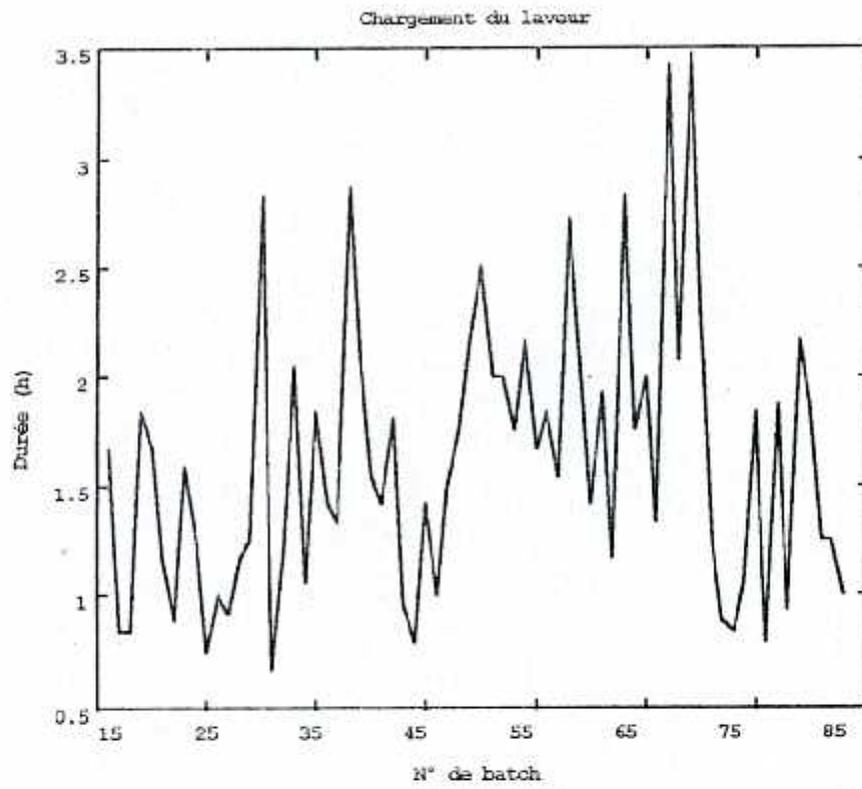
ANNEXE 2

**DISTRIBUTION STATISTIQUE
DES DIFFERENTES OPERATIONS**

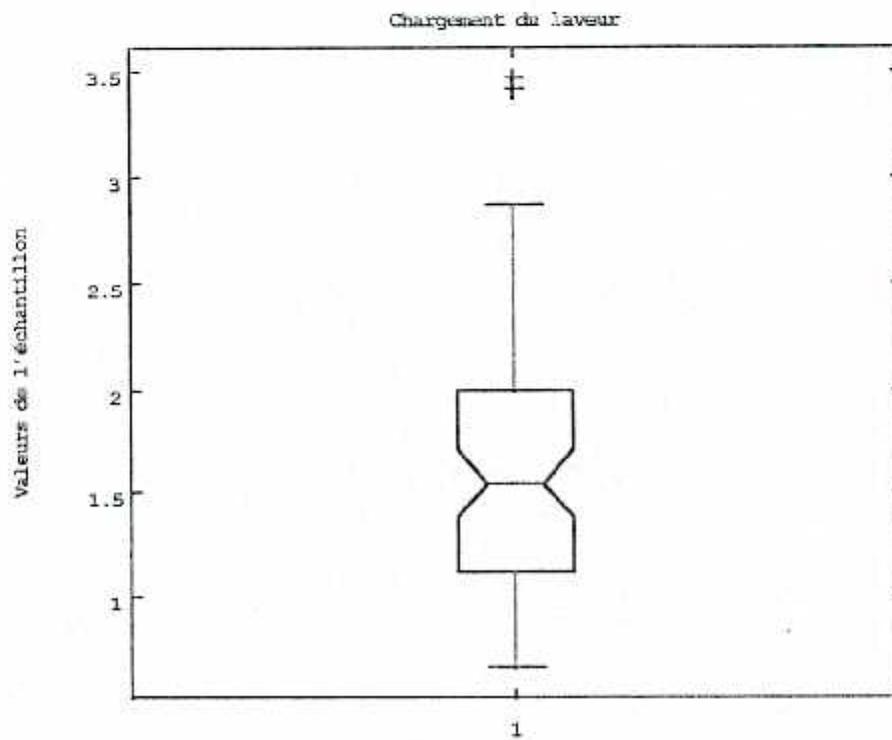


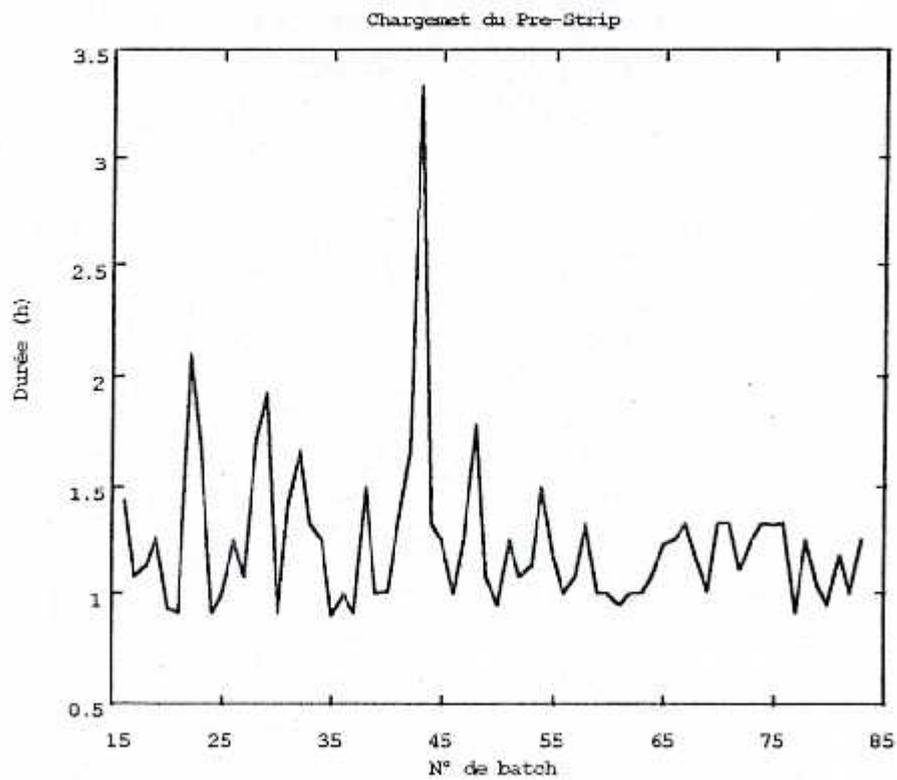
Rem : les numéros de batch correspondent aux numéros qui apparaissent dans les feuilles de suivi.



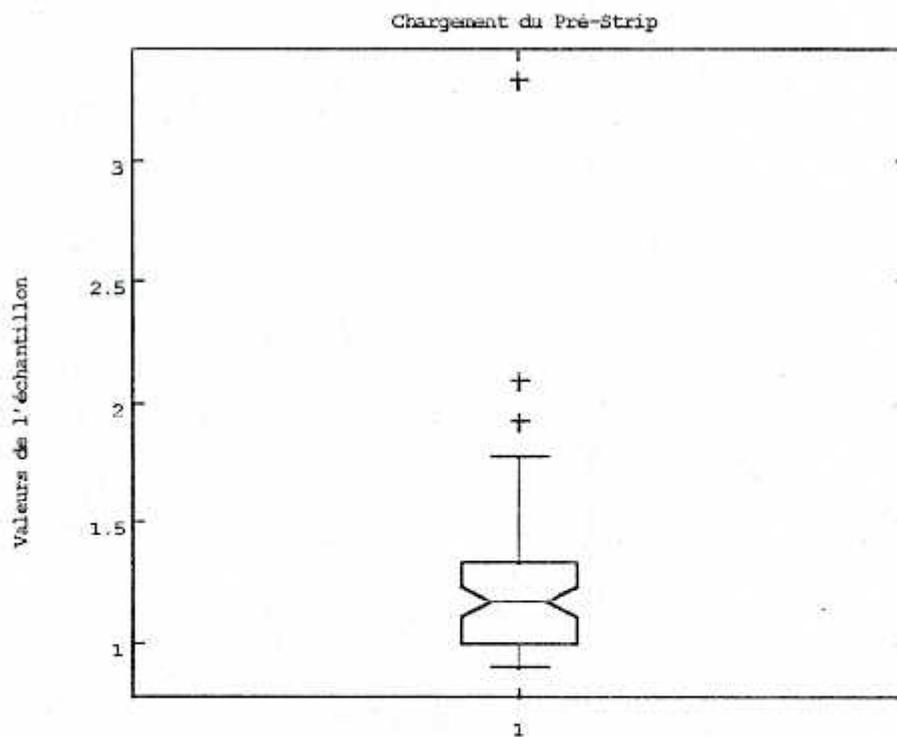


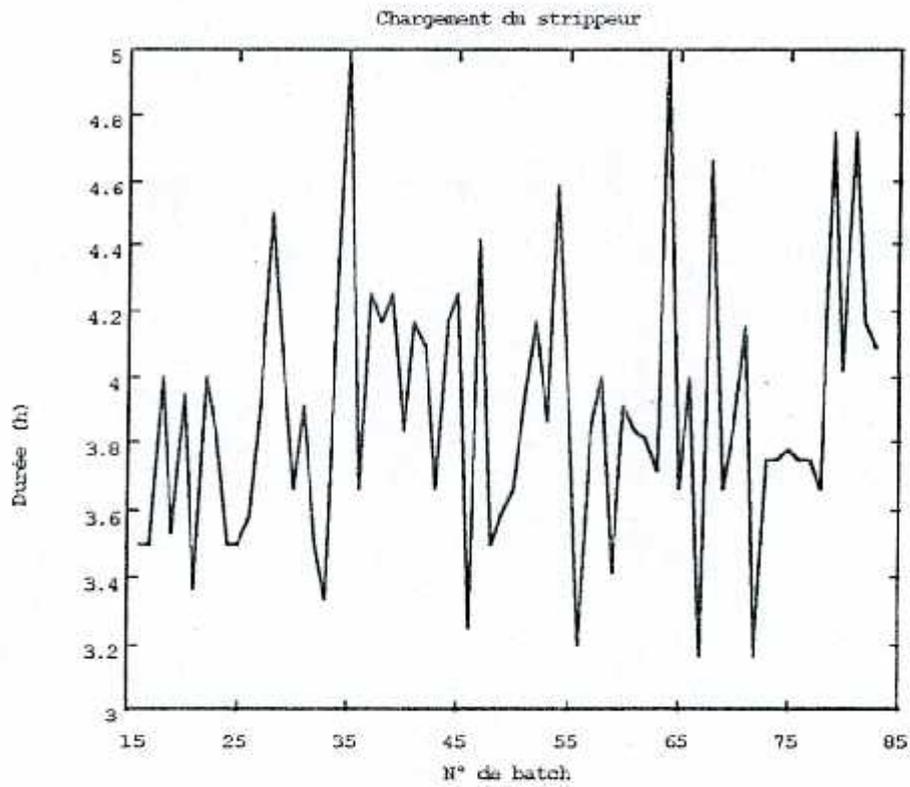
Rem : les numéros de batch correspondent aux numéros qui apparaissent dans les feuilles de suivi.



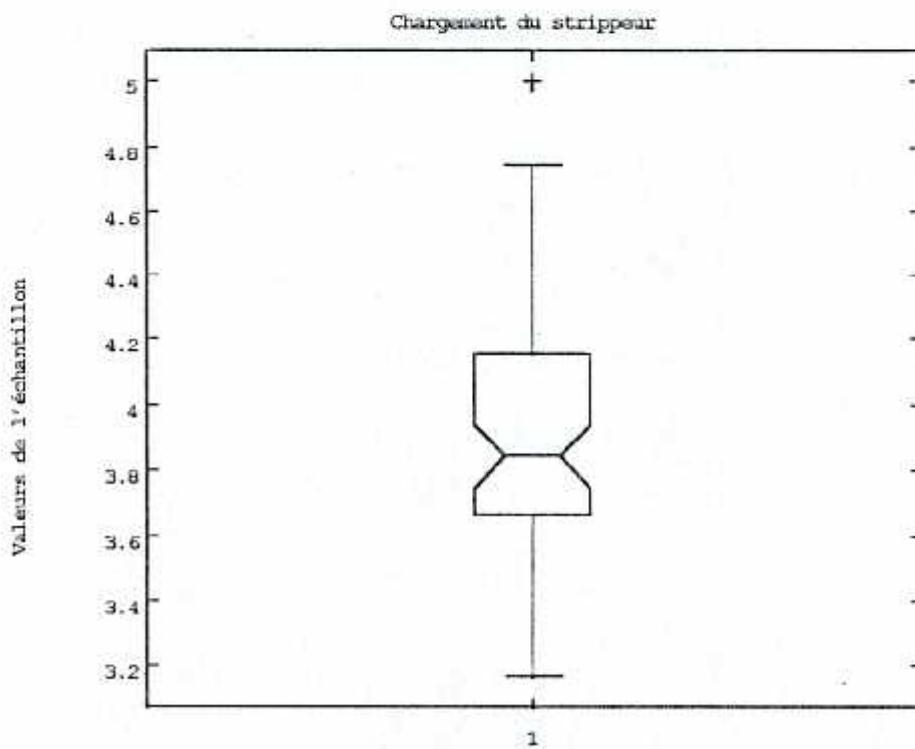


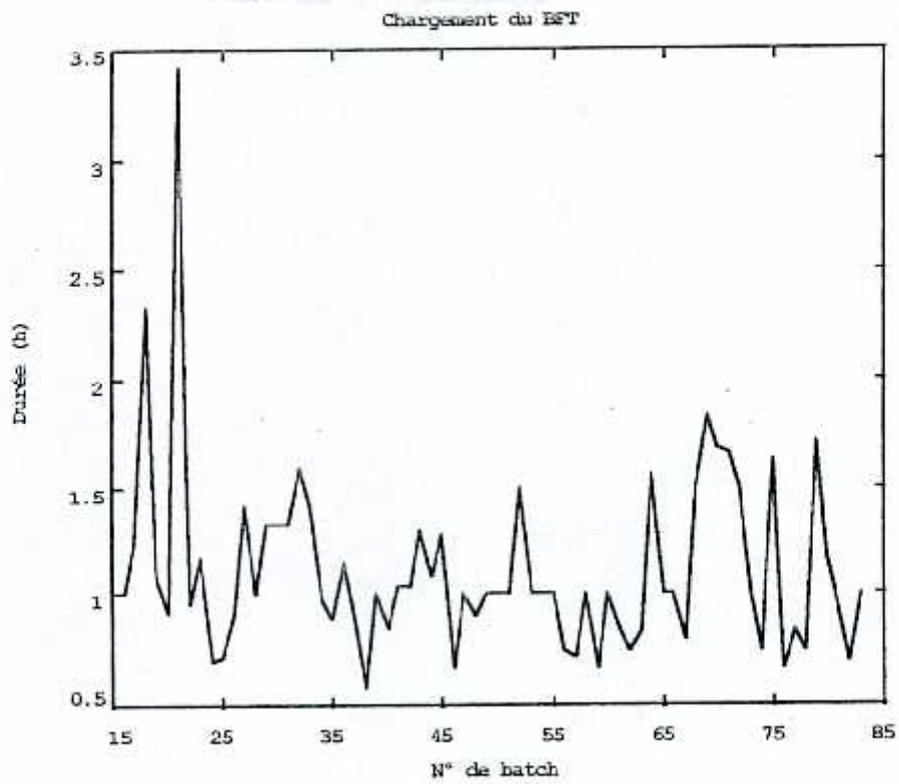
Rem : les numéros de batch correspondent aux numéros qui apparaissent dans les feuilles de suivi.



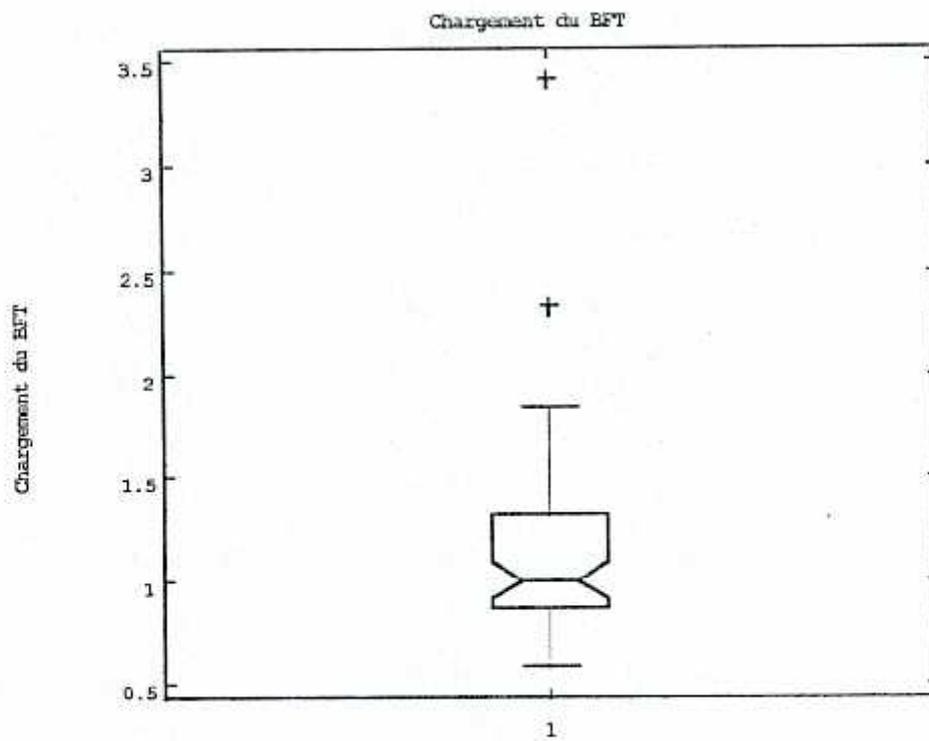


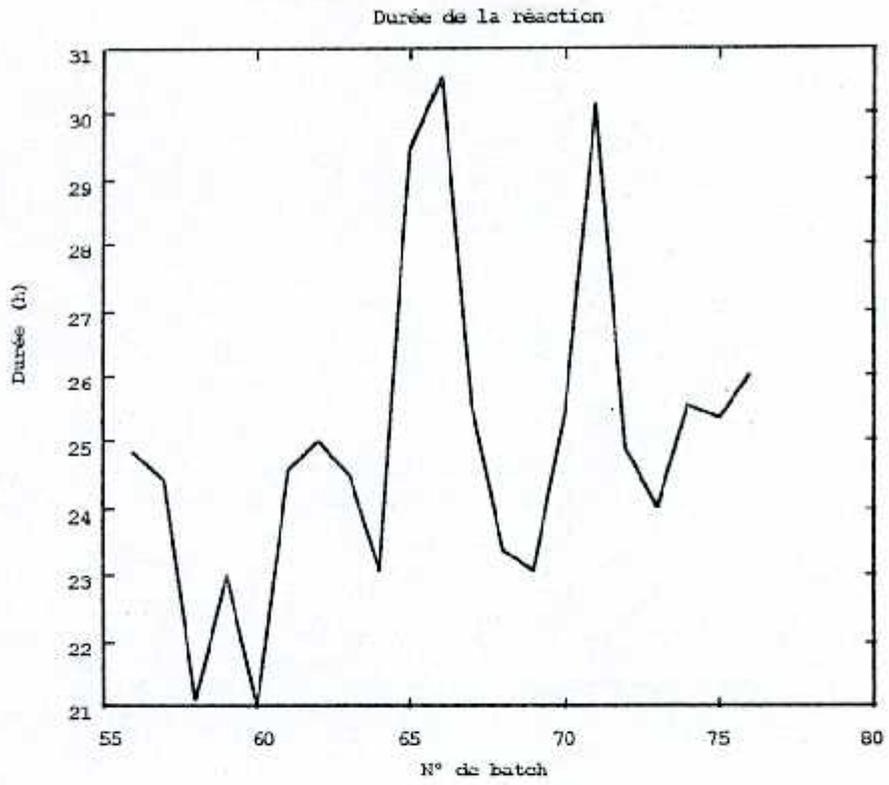
Rem : les numéros de batch correspondent aux numéros qui apparaissent dans les feuilles de suivi.



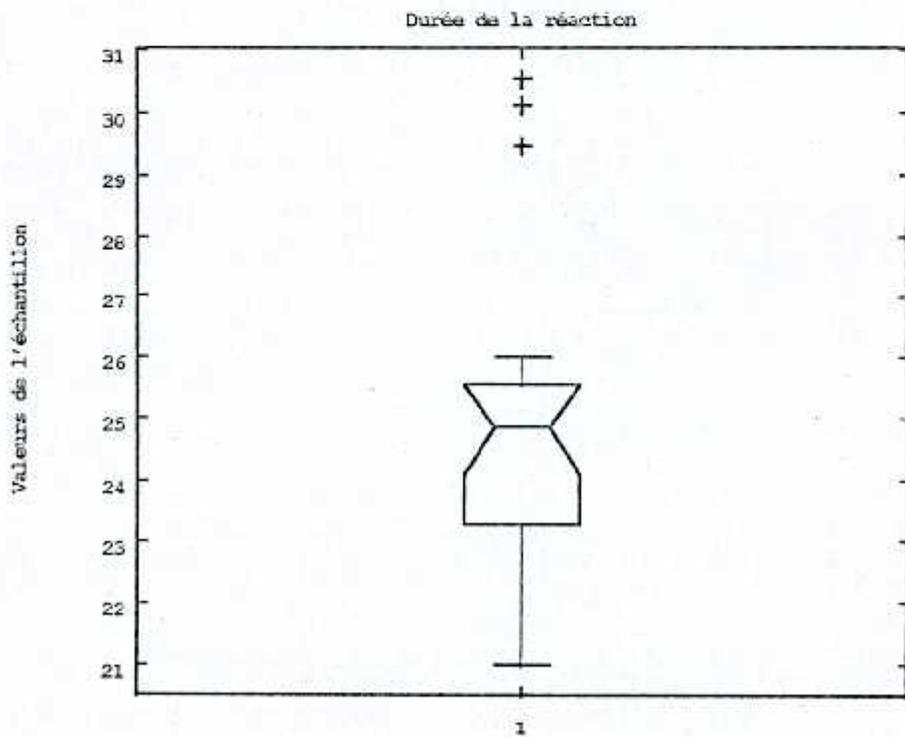


Rem : les numéros de batch correspondent aux numéros qui apparaissent dans les feuilles de suivi.

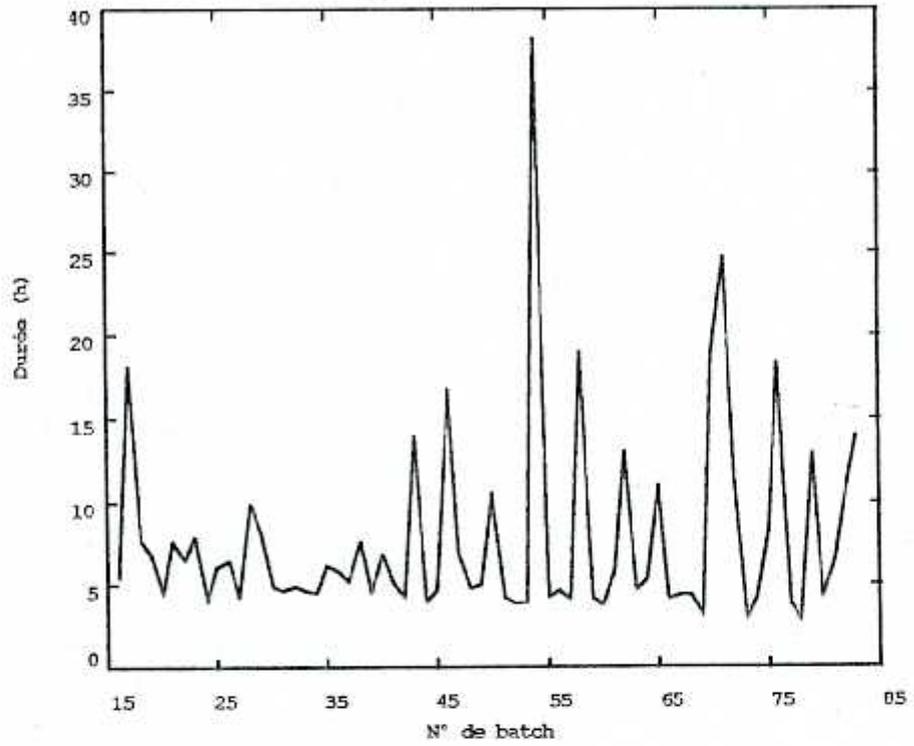




Rem : les numéros de batch correspondent aux numéros qui apparaissent dans les feuilles de suivi.

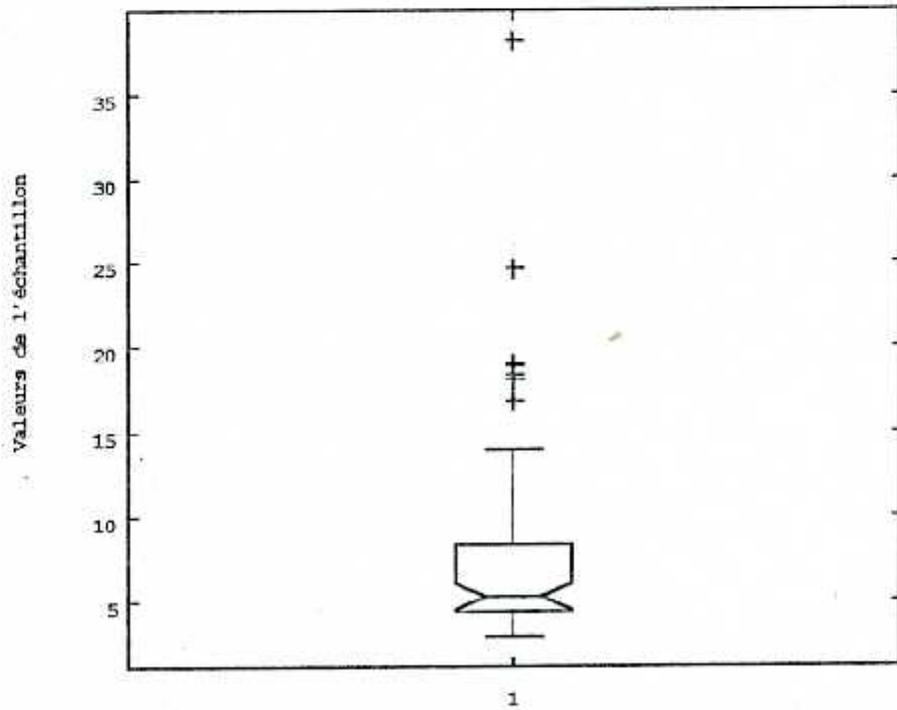


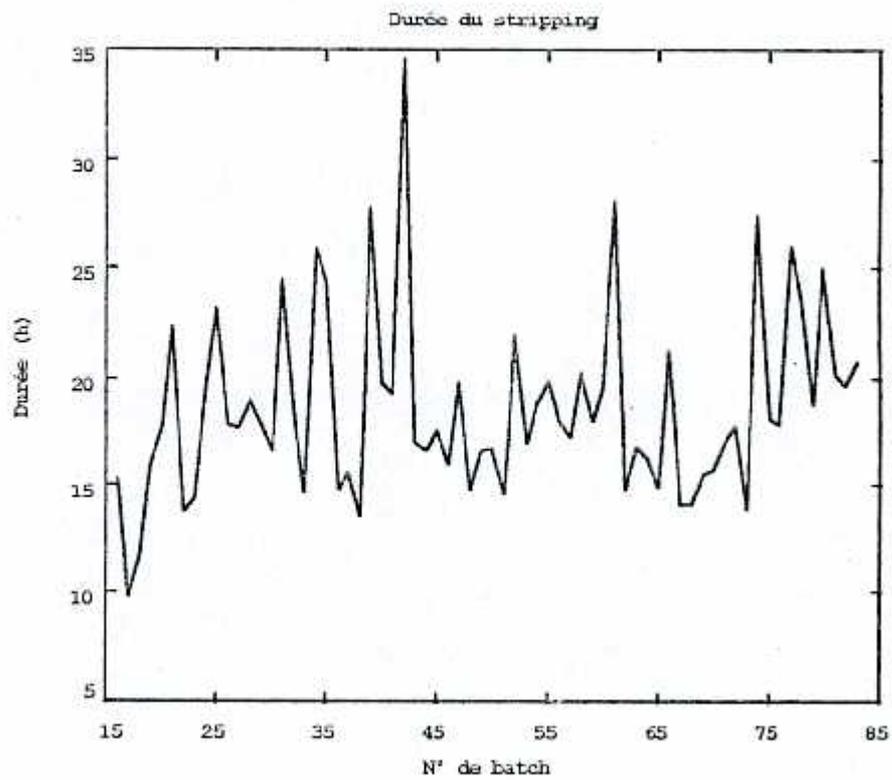
Séjour dans le Pre-Strip



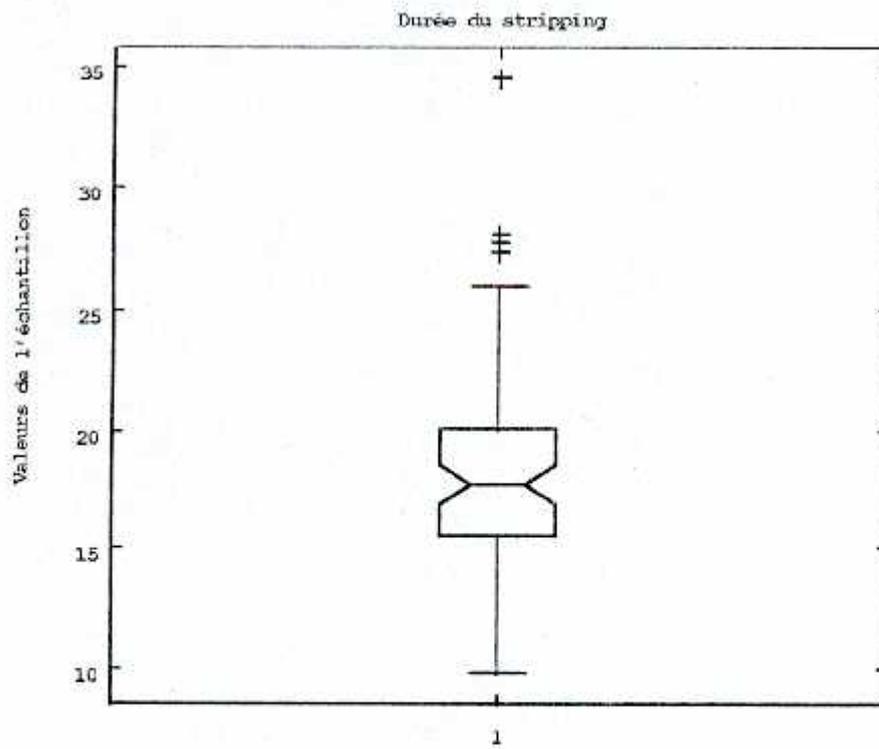
Rem : les numéros de batch correspondent aux numéros qui apparaissent dans les feuilles de suivi.

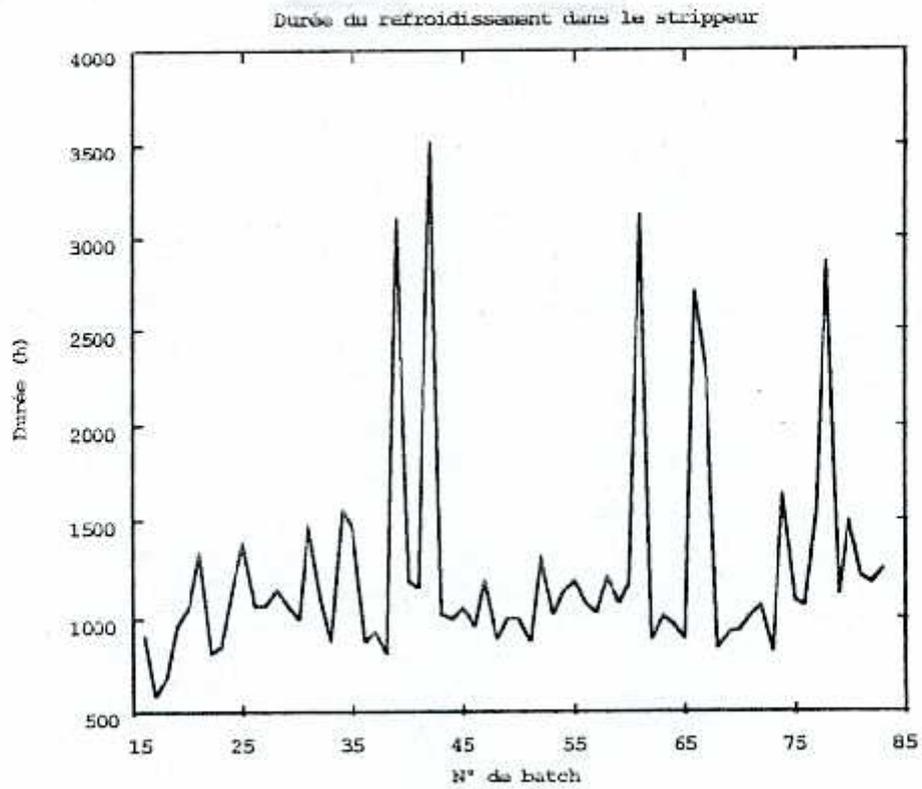
Séjour dans le Pré-Strip



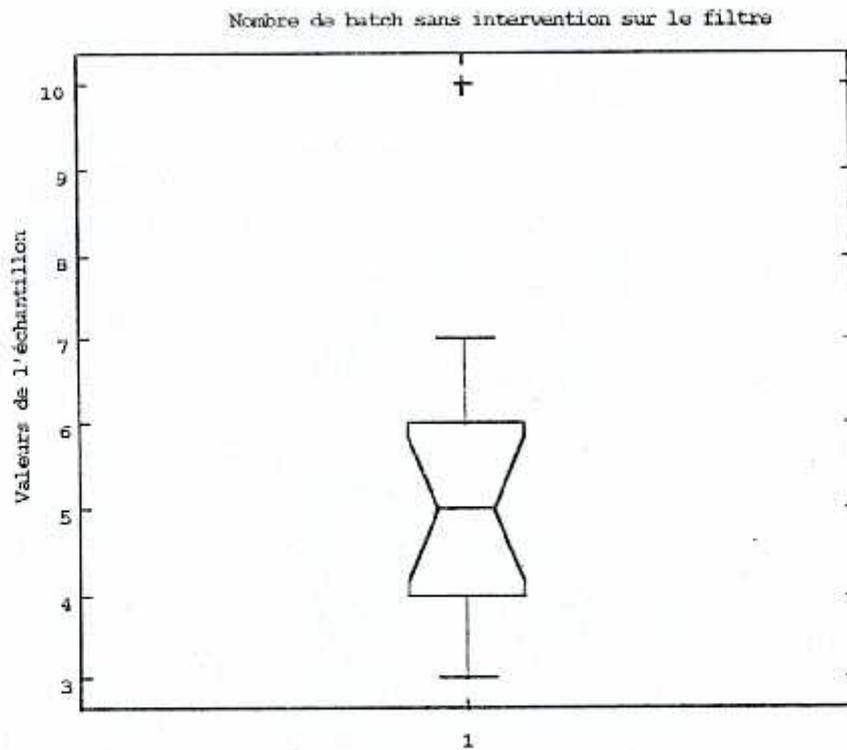


Rem : les numéros de batch correspondent aux numéros qui apparaissent dans les feuilles de suivi.

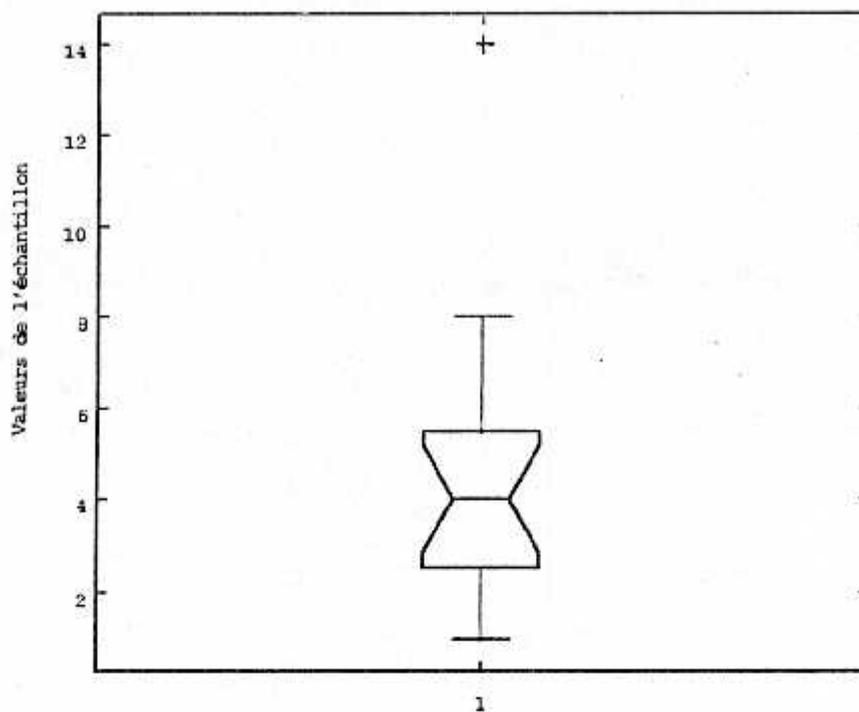




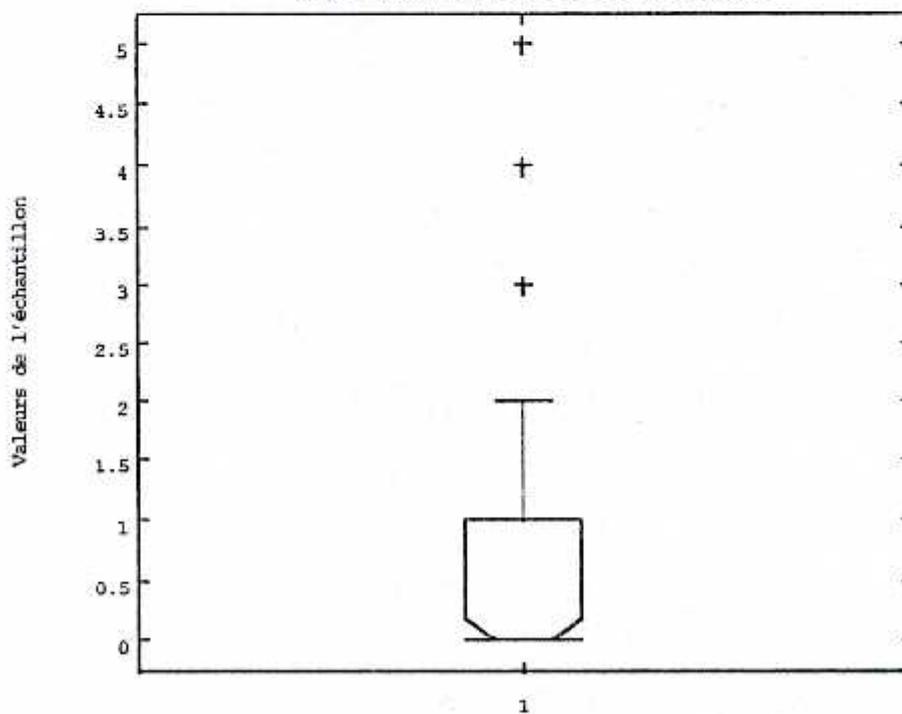
Rem : les numéros de batch correspondent aux numéros qui apparaissent dans les feuilles de suivi.



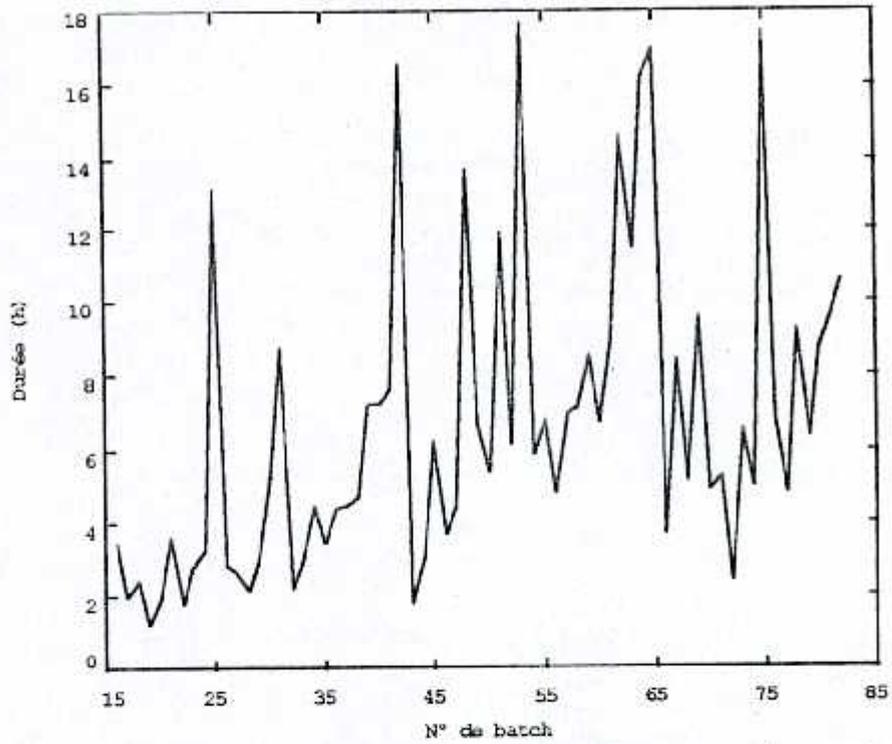
Nombre de batch entre deux entretiens du reacteur



Nombre d'intervention sur le filtre F1101

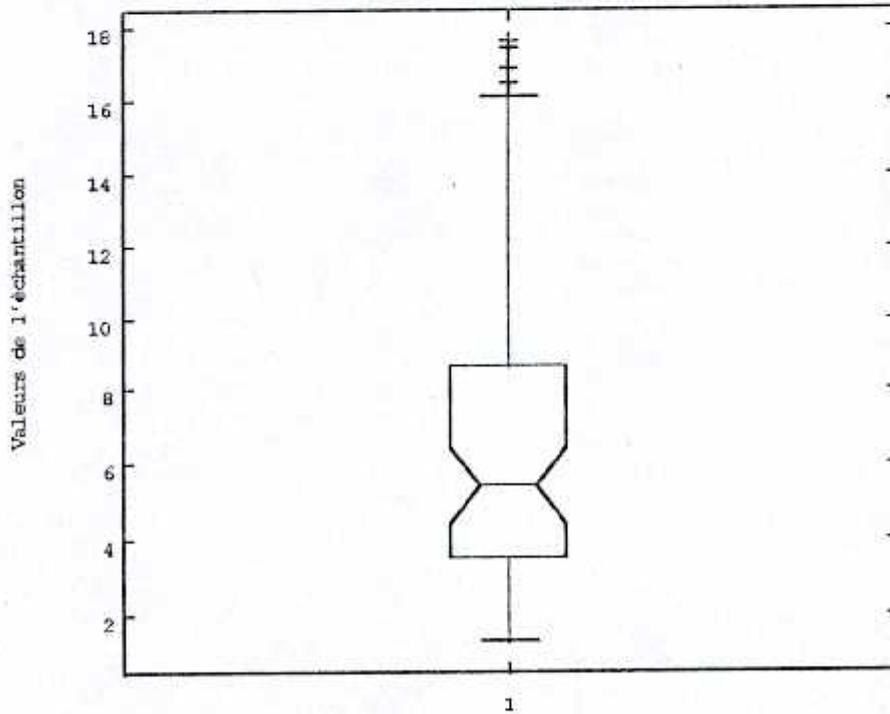


Conditionnement des stockeurs

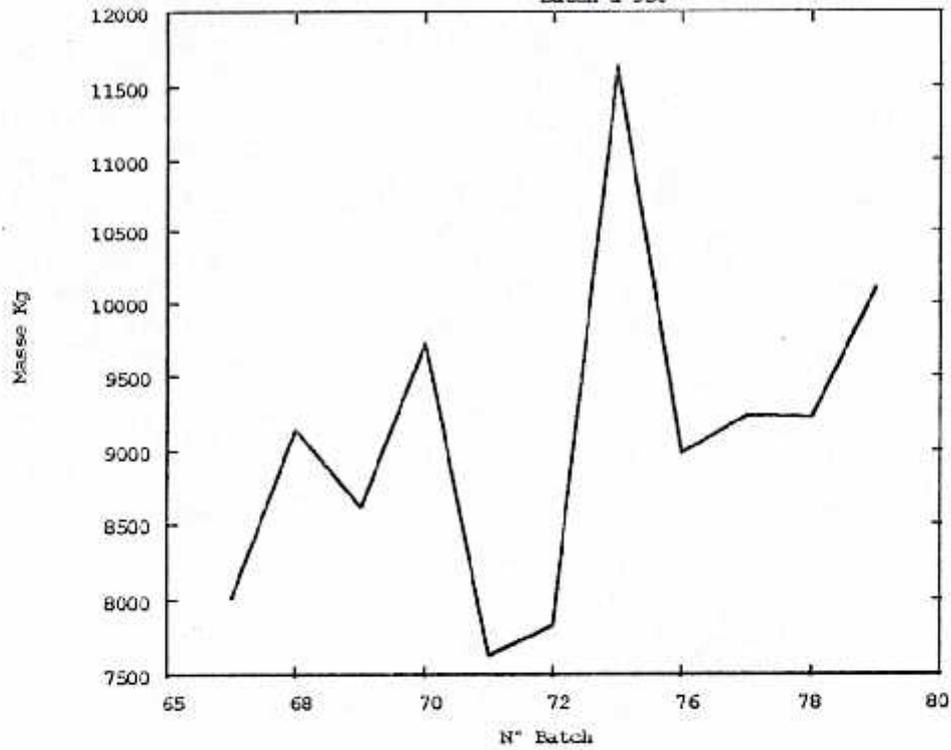


Rem : les numéros de batch correspondent aux numéros qui apparaissent dans les feuilles de suivi.

Conditionnement des stockeurs

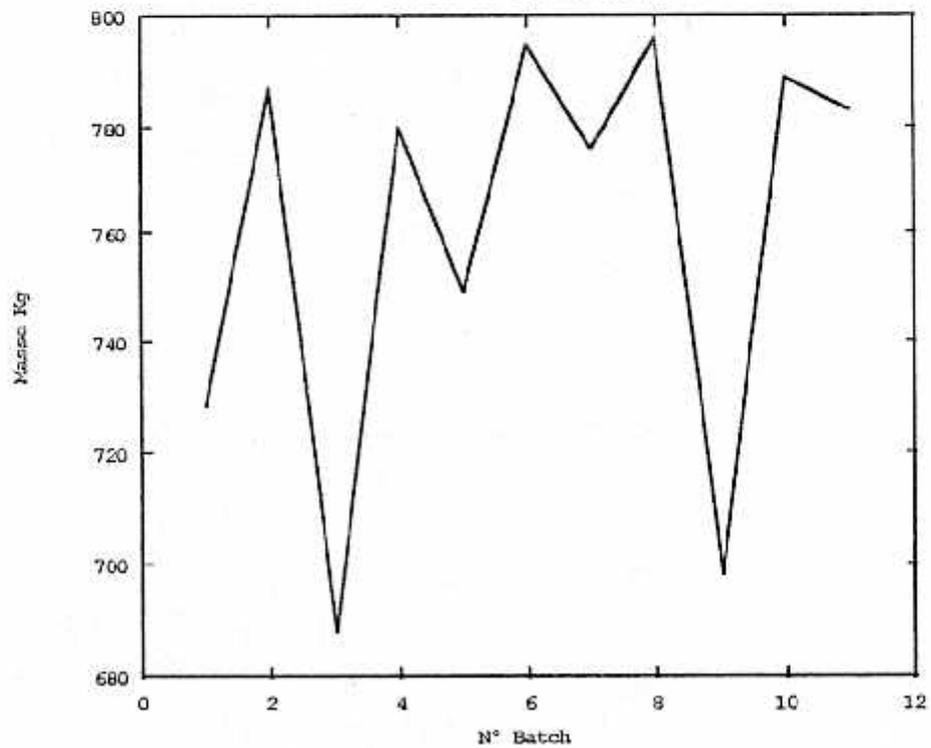


Masse de solvant chargée dans le laveur
batch à 95%

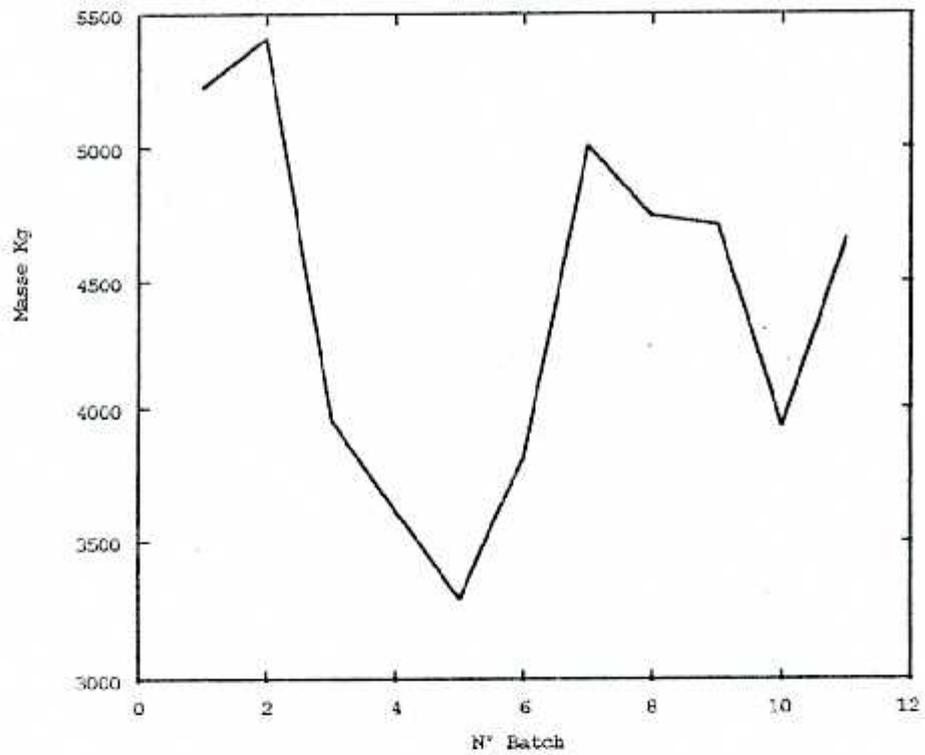


Rem : les numéros de batch correspondent aux numéros qui
apparaissent dans les feuilles de suivi.

Masse de sel chargée dans le laveur
batch à 95%

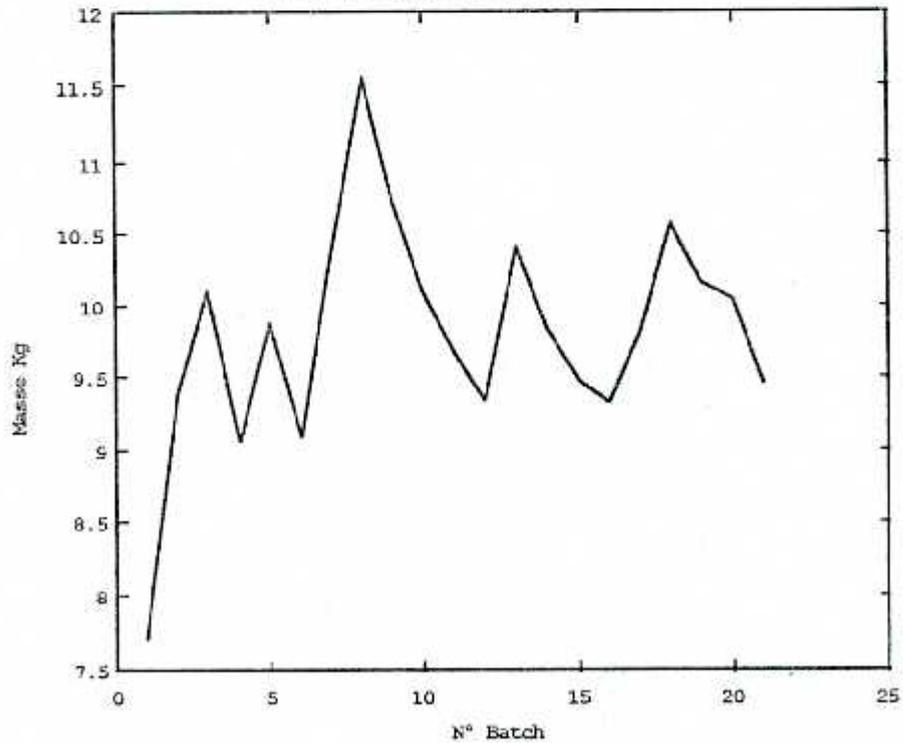


Masse de soude chargée dans le laveur
batch à 95%



Rem : les numéros de batch correspondent aux numéros qui
apparaissent dans les feuilles de suivi.

Masse de EMIQ chargée dans le EFT



ANNEXE 4

Problème d'ordonnancement et méthode PERT

La conception et la gestion d'un projet complexe composés de multiples travaux élémentaires pose des problèmes délicats au niveau :

- De la planification (prévision du déroulement des tâches, établissement d'un calendrier)
- Du contrôle de l'exécution du projet (coordination, réajustement des prévisions etc...)

Les techniques d'ordonnancement ont pour objet d'aider à la résolution de ce type de problème.

Résoudre un problème d'ordonnancement, c'est donner en général l'ordre dans lequel devront être exécutées les différentes tâches de manière à optimiser une certaine fonction objective (ex : durée de l'exécution totale du projet aussi brève que possible) tout en satisfaisant certaines contraintes (antériorité de certaines tâches par rapport à d'autres etc...)

La méthode de PERT est structurée sur la base de :

- La confection d'un graphe traduisant l'organisation de l'ensemble des tâches les unes par rapport aux autres.
- La recherche du chemin critique ou on peut en avoir plusieurs dans le même graphe ou réseau.
- L'introduction des temps accompagnée de la durée de réalisation de l'ensemble des opérations du calcul des marges.

ANNEXE 3

BREF APERCU SUR ARENA

ARENA est un logiciel de simulation écrit et structuré dans le langage SIMAN qui permet la description des modèles, la gestion des données, le calcul et la présentation des résultats.

ARENA est un logiciel dédié à la modélisation et la simulation de systèmes de production en général et non spécialement aux procédés chimiques.

Son langage de support est le C.

Les systèmes d'exploitation possible sont :

- Station (UNIX)
- PC (DOS ou OS/2)

Concepts fondamentaux

Les ACTIVITES sont regroupées en PROCESSUS ; ces processus sont décrits par un ensemble de BLOCS FONCTIONNELS prédéfinis.

L'algorithme du CHANGEMENT D'ETAT est connu dans le bloc.

Un bloc peut faire appel à la LIBRAIRIE des procédures prédéfinis ou à une PROCEDURE UTILISATEUR qui décrit les REGLES de DECISION.

Les activités sont déclenchées par le passage d'ENTITES dans les blocs fonctionnels constitutifs.

L'ETAT du système est caractérisé par :

- Des VARIABLES GLOBALES, siman et utilisateurs.
- Des ATTRIBUTS portés par les entités.

LISTE DES SYMBOLES

AA : produit chimique
AMA : produit chimique
AMS : produit chimique
G : loi géométrique (loi de probabilité)
HQ : produit chimique
M : médiane
N : loi normale
Q : quartile
Tcl : temps d'un cycle de production (h)
Ts : temps de séjours d'un batch dans l'unité (h)
W : loi de Weibull
a : ordre
e : espérance mathématique
m : moyenne arithmétique
 χ^2 : test statistique (test du Khi-Deux)
 α : seuil d'erreur
 θ : valeur du Khi-Deux tabulée
 σ : écart type